

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Vliv teploty na útlum pasivních optických děličů

**Influence of temperature on attenuation of passive
optical splitter**

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Jan Šnapka

Studijní program:

N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601T013 Telekomunikační technika

Téma:

Vliv teploty na útlum pasivních optických děličů
Influence of temperature on attenuation of passive optical splitters

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický popis optických vazebních členů.
2. Proměřte vliv teploty na útlum pasivních optických děličů.
3. Vyhodnoťte naměřená a vypočtená data.

Seznam doporučené odborné literatury:

LOPÉZ-HIGUERA, José Miguel. *Handbook of optical fibersensing technology*. England (West Sussex) : John Wiley and sons, Ltd., 2002. 795 s. ISBN 0-471-82053-9.

FILKA, Miloslav. *Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku*. Brno : VUTUM, 2009. 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Šiška, Ph.D.**

Datum zadání: 19.11.2010

Datum odevzdání: 06.05.2011



prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě, dne 4. 5. 2011

.....
podpis

Abstrakt

Tato diplomová práce se zaměřuje na jednu z nejrozšířenějších pasivních optických součástek současnosti, a to na pasivní optický dělič. První část práce se zaměřuje na teoretický popis pasivních optických děličů, jejich klíčové parametry a také na způsob jejich výroby. Druhá část práce se zaměřuje na měření závislosti parametrů děličů na okolní teplotě. Měření probíhalo ponořením čtyř děličů do vodní lázně a měření výkonů na jednotlivých větvích se stoupající teplotou. Závislost byla měřena v rozsahu teplot 20 °C až 100 °C a pro vlnové délky 1310 nm a 1550 nm. Výsledky byly zapsány do tabulek a z vypočtených hodnot byly vyneseny grafy a regresní křivky. V poslední části je vyhodnocení získaných závislostí.

Klíčová slova

Pasivní optický dělič, závislost teploty, útlum, optický výkon, pasivní optická síť, výroba pasivních optických děličů, měření útlumu pasivních optických součástek, regresní analýza.

Abstract

This graduation thesis focuses on one of most widespread passive optical component, which is passive optical splitter. First part of this thesis focuses on description of theoretical parameters and fabrication techniques of passive optical splitter. Second part of this thesis focuses on measuring of temperature influence on attenuation of passive optical splitter. This measuring proceeded by submersion of four splitters in water bath and measuring its optical power at the end of each leg of splitter. Influence was measured in temperature range from 20 °C to 100 °C and for wavelengths 1310 nm and 1550 nm. The results were written in the tables, graphs and regression curves have been made from calculated values. Last part of this thesis consist of evaluation of influences.

Keywords

Passive optical splitter, temperature influence, attenuation, optical power, passive optical network, fabrication of passive optical splitter, attenuation measurment of passive optical components, regression analysis.

Seznam použitých symbolů a zkratek

a	m	průměr jádra vlákna
d	m	vzdálenost jader od sebe
β	m^{-1}	konstanta šíření módu v optickém vlákně
z	m	délka části děliče u, které dochází k přenosu výkonu
L_C	m	minimální délka části děliče pro kompletní přenos výkonu
P	W	optický výkon
κ	m^{-1}	součinitel vazby vláken
$\Delta\beta$	m^{-1}	kumulovaný fázový posun
λ_0	nm	pracovní vlnová délka
$P_1(0)$	W	výkon vstupující ve vlákno 1 do děliče
$P_1(z)$	W	výkon ve vlákno 1 ve vzdálenosti z od začátku dělicí zóny
$P_2(z)$	W	výkon ve vlákno 2 ve vzdálenosti z od začátku dělicí zóny
n_1		index lomu jádra optického vlákna
n_2		index lomu pláště optického vlákna
V		normalizovaná frekvence
A		pomocný parametr
B		pomocný parametr
C		pomocný parametr
\bar{d}		poměr velikostí jader vláken a jejich vzdáleností od sebe
L	m	délka děliče
D_P	$\%$	dělicí poměr
A_{VL}	dB	vložný útlum
A_{ZB}	dB	zbytkový útlum
$A_{PŘ}$	dB	útlum přeslechu

P₀	W	referenční optický výkon
P₁	W	optický výkon ve větvi 1
P₂	W	optický výkon ve větvi 2
P₃	W	optický výkon ve větvi 3
P₄	W	optický výkon ve větvi 4
P₅	W	optický výkon ve větvi 5
A_{1a}	dB	útlum metody vložných ztrát 1a
A_{1b}	dB	útlum metody vložných ztrát 1b
A_{1c}	dB	útlum metody vložných ztrát 1c
A_{konektoru}	dB	útlum konektorů
A_{vzorku}	dB	útlum měřeného vzorku
N		počet výstupů děliče

FTTx	fiber to the ..	širokopásmové síťové architektury
WDM	wavelength division multiplexing	vlnový multiplex
FBT	fused biconical tapered	výroba tažením
PLC	planar lightwave circuit	výroba planární technologií
FHD	flame hydrolysis deposition	plamenná hydrolýza
LAN	local area network	místní síť

Obsah

1. Úvod	1
2. Princip fungování	2
2.1 Energetická výměna	3
2.2 Součinitele vazby κ u identických děličů	5
2.3 Vlnový multiplex/demultiplex	7
3. Výrobní procesy optických děličů	8
3.1 Výroba pasivních optických děličů leštěním	8
3.2 Výroba děličů tavením	10
3.3 Výroba děličů pomocí planární technologie	11
4. Praktické parametry	14
5. Měření útlumu pasivních optických součástek	16
5.1 Transmisní metody	16
5.1.1 Metoda dvou délek	16
5.1.2 Metoda vložných ztrát	17
5.2 Metoda zpětného rozptylu	19
6. Měření	20
6.1 Použité zdroje	21
6.2 Použité přístroje měřící výkon	22
6.3 Vodní lázeň	23
6.4 Měření teploty	24
7. Použité děliče	27
8. Naměřené a vypočtené výsledky	32
8.1 Vložný útlum	33
8.2 Útlum přeslechu	35
8.3 Dělicí poměr	39
8.4 Zbytkový útlum	40
9. Analýza naměřených a vypočtených hodnot	41
9.1 Vložný útlum	41
9.2 Dělicí poměr	46
10. Závěr	48

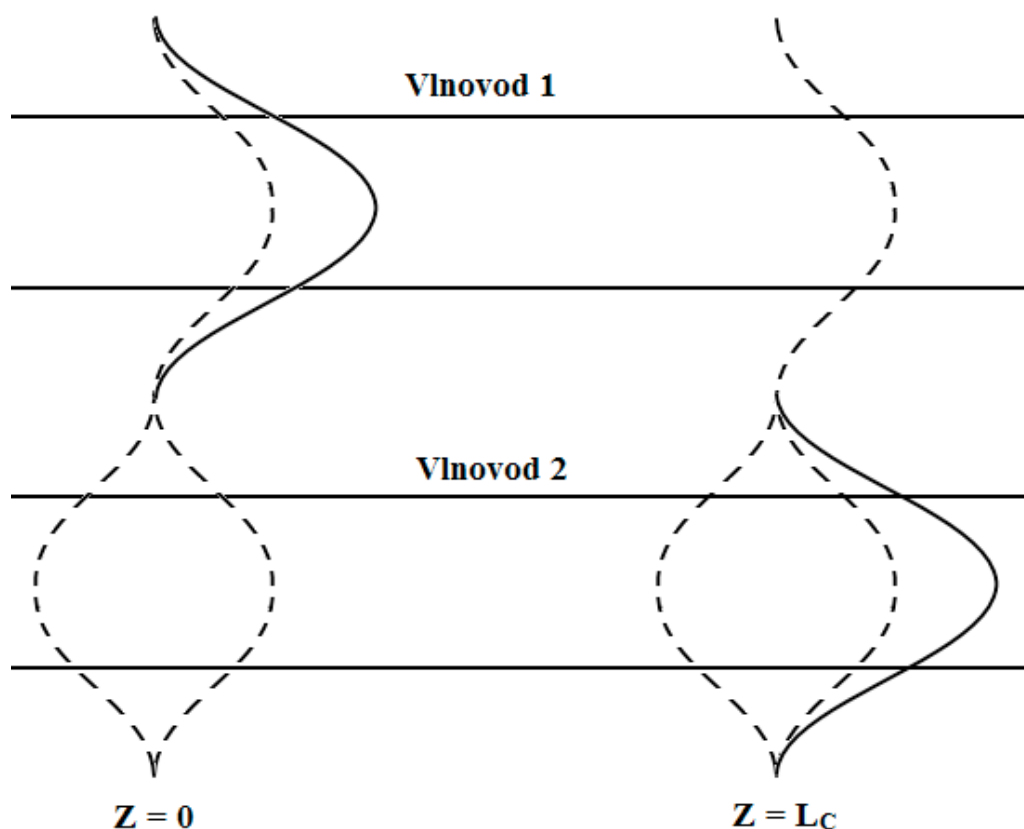
1. Úvod

S rozvojem moderních datových služeb roste poptávka od uživatelů po dostatečné kvalitě přenosových systémů zaručujících splnění všech požadavků na přenosový objem dat. Přenosový objem dat v poslední době výrazně roste obzvláště v oblasti multimédií. Současné sítě, zajišťující připojení těchto služeb k uživateli, jsou v dnešní době vystavěny hlavně na metalických vedeních. Tyto sítě do budoucna nebudou schopny všude splnit stanovené požadavky, jednak z hlediska omezení přenosové rychlosti, nebo z hlediska citlivosti metalických vláken na určité fyzikální faktory, jako je například magnetické pole. Proto v poslední době dochází k velkému rozvoji optických sítí. V dnešní době je časté použití přístupových sítí FTTx, kde optická část přípojek je založena na pasivních optických sítích. V topologii těchto pasivních optických sítí je velmi používanou součástí pasivní optický dělič. Jedná se o součástku, která vyvazuje část vstupujícího optického výkonu a tento výkon rozděluje do výstupních větví. Princip této pasivní součástky je založen na tom, že módové pole vedeného optického módu přesahuje daleko rozhraní jádro-plášť vlákna. Pokud tedy přiblížíme dvě jádra optických vláken dostatečně blízko, dojde k přenosu optického výkonu z jednoho jádra do druhého. Dělič není závislý na přenosovém protokolu či přenosových rychlostech. Použití těchto součástek není omezeno pouze na rozdělování výkonu, ale uplatní se dobře jako vlnový multiplex/demultiplex u sítí WDM, nebo jako součástka v různých opticko-senzorických zařízeních. Pasivní optický dělič je pro dnešek, ale hlavně do budoucna velmi důležitou součástí při budování optických sítí. Výroba těchto součástek se začínala zdoluhavým procesem leštění dvou optických vláken, avšak dnešní planární proces výroby je automatizovaný a tím pádem rychlý a levný, s počtem výstupních větví více než 100.

Tato diplomová práce se zaměřuje na tuto pasivní optickou součástku a hlavně na závislost jejich přenosových parametrů na rostoucí okolní teplotě. Jak bylo zmíněno, pasivní optický dělič je součástka často používaná v pasivních optických sítích, kde bývá často uložena na místech, které mohou podléhat prudkým teplotním změnám, např. svítící slunce na rozvodnou skříň umístěnou na střeše. Proto je důležité znát vliv teploty na přenášený signál, aby nedocházelo k nechtěnému utlumení signálu, či jiným nežádoucím jevům.

2. Princip fungování ^[1]

Pro pochopení principu fungování pasivních optických děličů, je třeba si je představit jako dva identické jednomódové planární vlnovody. Tento vlnovodný systém je možno vidět jako jeden vlnovod s dvěma jádry. Tento systém bude mít dva módy, symetrický a první vybudzený bude antisymetrický. Každý z těchto módů bude mít rozdílnou konstantu šíření β . Když je výkon v jedné části jádra vlnovodu dostatečný, dojde k vytvoření lineární kombinace symetrického a antisymetrického módu. Módy si mezi sebou kvůli rozdílným konstantám šíření vybudují fázový posuv, jak postupují ve vlnovodném systému. Pokud se nahromadí fázový posuv bude roven π , pak bude výsledkem superpozice těchto módových polí vyrušení módového pole v prvním vlnovodu a zvětšení v druhém, což znamená přechod výkonu z prvního vlnovodu do druhého (obr. 1). Pokud se posunem ještě jednou tak daleko, ve vlnovodném systému bude nashromážděný fázový posuv roven 2π . V této vzdálenosti dojde k opačné superpozici módových polí a k přenosu výkonu zpět do prvního vlnovodu. Takto dochází k periodickému předávání energie z jednoho vlnovodu do druhého.



Obr. 1: Superpozice módových polí na začátku vlnovodného systému ($Z = 0$) a v bodě kdy dojde ke kompletnímu přenosu výkonu ($Z = L_c$)

2.1 Energetická výměna

Uvažujme, že pasivní optický dělič je tvořen dvěma neidentickými jednomódovými vlákny se základními lineárně polarizovanými módy LP_{01} , módy ve vláknech mají jiné konstanty šíření β_1 a β_2 . $P_1(0)$ je vyslaný výkon do prvního vlákna v bodě vzdálenosti $z = 0$. Výkony v obou vláknech jsou popsány v rovnici (1) pro výkon v prvním vláknu $P_1(z)$ a v rovnici (2) pro výkon v druhém vláknu $P_2(z)$ v závislostech na vzdálenosti z .

$$P_1(z) = P_1(0) \cdot \left(1 - \frac{\kappa^2}{\gamma^2} \sin^2 \gamma z \right) \quad (1)$$

$$P_2(z) = P_1(0) \cdot \frac{\kappa^2}{\gamma^2} \sin^2 \gamma z \quad (2)$$

Kde se γ^2 vypočítává rovnicí (3).

$$\gamma^2 = \kappa^2 + \frac{1}{4}(\Delta\beta)^2 \quad (3)$$

$$\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2 \quad (4)$$

Hodnota κ se nazývá součinitel vazby vláken a udává sílu, jakou se dvě vlákna navzájem ovlivňují. Tato hodnota závisí na parametrech vláken, vzdálenosti jader vláken od sebe a pracovní vlnové délce. Pokud jsou jádra vláken od sebe vzdálená příliš, nedochází k interakci mezi vlákny a v takovém případě je hodnota $\kappa = 0$. Pak nám po úpravě rovnic (1) a (2) vychází vztah (5), kdy všechna energie zůstává v prvním vlákně.

$$P_1(z) = P_1(0) \quad P_2(z) = 0 \quad (5)$$

Parametr $\Delta\beta$ je kumulovaný fázový posun a počítá se ze vztahu (4).

$$P_1(0) = P_1(z) + P_2(z) \quad (6)$$

Vztah (6) jen vyjadřuje, jak v tomto systému funguje zákon zachování energie.

Podle velikostí konstant šíření v jednotlivých vláknech můžeme určit dva případy chování:

1. V prvním speciálním případě je velikost konstant šíření v prvním a druhém vlákne stejná. V takovém případě nedochází k fázovému posunu $\Delta\beta = 0$ a rovnice (1) a (2) lze zjednodušit na tvary (7) a (8).

$$P_1(z) = P_1(0) \cdot \cos^2(\kappa \cdot z) \quad (7)$$

$$P_2(z) = P_1(0) \cdot \sin^2(\kappa \cdot z) \quad (8)$$

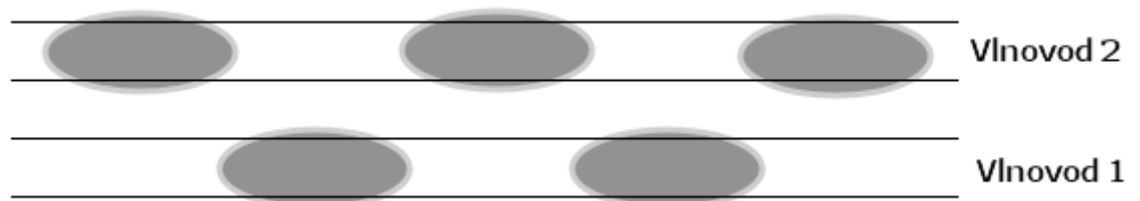
Kde hodnota z se určuje ze vztahu (9), kde m je celé nezáporné číslo $m = 0, 1, 2, \dots$

$$z = \frac{m \cdot \pi}{\kappa} \quad (9)$$

Minimální vzdálenost, při které je výkon kompletně přenesen z jednoho vlákna do druhého (L_C) je dána vztahem (10).

$$z = L_C = \frac{\pi}{2\kappa} \quad (10)$$

Typické hodnoty součinitele vazby κ je v rozmezí $0,8 \text{ mm}^{-1}$ až $0,3 \text{ mm}^{-1}$. Což znamená, že minimální slučovací délka má hodnoty 2 až 5 mm.



Obr. 2: Schematické znázornění rozdělení velikosti přenosu energie mezi vlákny při nulovém fázovém posuvu

V takovém případě dochází ke střídavému přenosu výkonu mezi vlákny, jak je naznačeno na obr. 2.



Obr. 3: Schématické znázornění rozdělení velikosti přenosu energie mezi vlákny s fázovým posunem

2. V druhém případě mají módy rozdílné koeficienty šíření $\beta_1 \neq \beta_2$. V tomto případě se vývoj přenášeného výkonu popisuje vztahy (1) a (2). Pro kompletní přenos energie z jednoho vlákna do druhého musí být zachována podmínka, že nesmi docházet k fázovému posuvu $\Delta\beta = 0$. Čím větší je poměr $\Delta\beta/2\kappa$, tím dochází k menšímu přenosu energie a proto u vláken s velkým fázovým posunem dochází k velmi malému přenosu energie i když jsou velmi blízko sebe. Přenos může vypadat jako na obr. 3.

2.2 Součinitel vazby κ u identických děličů

Pro určení schopnosti vazby dvou vláken je klíčový parametr κ , který jde popsat jako funkce vzdálenosti dvou jader vláken od sebe. Nejjednodušší určení součinitele vazby κ se provádí dle rovnice (11).

$$\kappa(d, V) = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\sqrt{\delta}}{a} \cdot e^{-(A+B\bar{d}+C\bar{d}^2)} \quad (11)$$

Kde a je poloměr jader vláken, d je vzdálenost jader vláken od sebe.

$$V = \frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot a \cdot \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (12)$$

Kde V je normalizovaná frekvence, λ_0 je pracovní vlnová délka, n_1 je index lomu jader a n_2 je index lomu plášťů.

$$A = 5,2789 - 3,663V + 0,3841V^2 \quad (13)$$

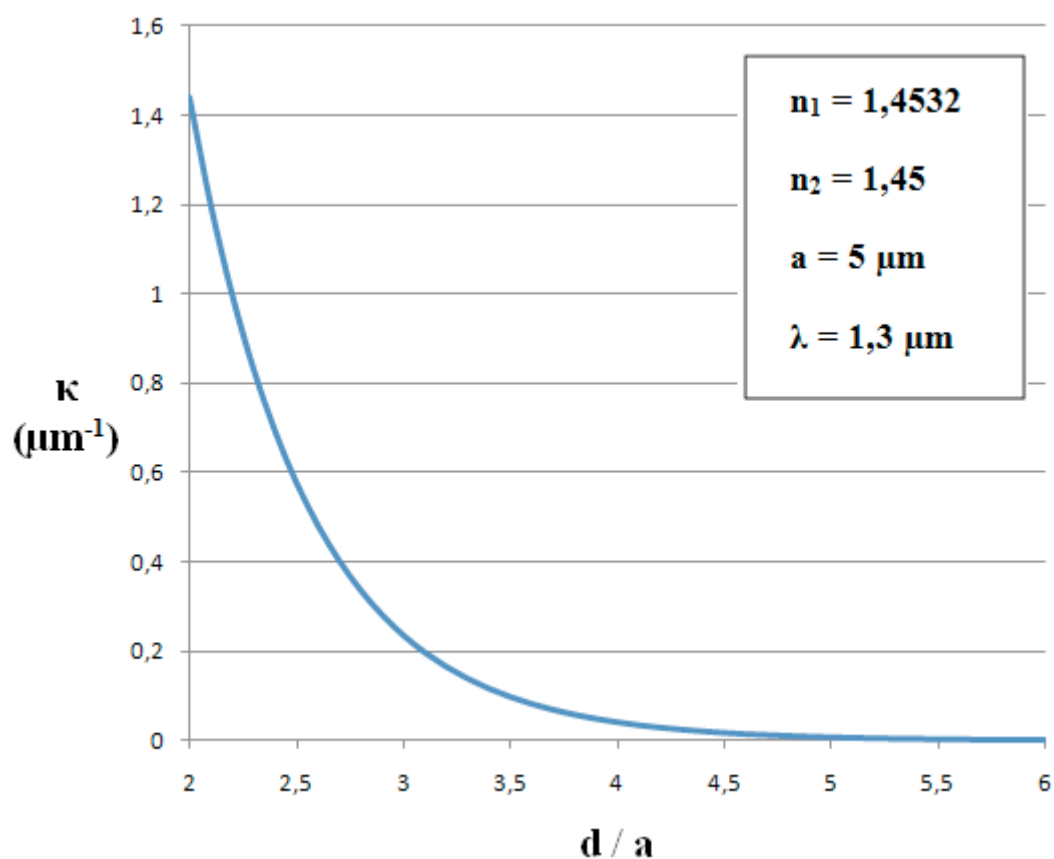
$$B = -0,7769 + 1,2252V - 0,0152V^2 \quad (14)$$

$$C = -0,0175 - 0,0064V - 0,0009V^2 \quad (15)$$

$$\delta = \frac{n_1^2 - n_2^2}{n_1^2} \quad (16)$$

$$\bar{d} = \frac{d}{a} \quad (17)$$

Z předešlých vztahů (11), (12), (13), (14), (15) je patrná závislost součinitele vazby κ na pracovní vlnové délce, ale také na vzdálenosti jader vláken od sebe (obr 4.).



Obr. 4: Závislost parametru κ na poměru d/a , při zvolených parametrech vláken a pracovní vlnové délce

2.3 Vlnový multiplex/demultiplex

Důležitou vlastností děličů je schopnost selektovat přenášený výkon podle vlnových délek. Děliče jsou součástky citlivé na vlnovou délku a to díky konstantám šíření módů β a součiniteli vazby κ , které jako takové jsou funkcí vlnové délky.

Představme si, že máme dělič délky L , vyrobený ze dvou identických vláken a součinitele vazby κ_1 pro vlnovou délku λ_1 a κ_2 pro vlnovou délku λ_2 .

$$\kappa_1 L = m\pi \quad (18)$$

$$\kappa_2 L = \left(m - \frac{1}{2}\right) \cdot \pi \quad (19)$$

V případě podmínek (18) a (19) jsou vysílány do vlákna signály na vlnových délkách λ_1 a λ_2 . Pak platí pro λ_1 vztah (20).

$$P_2(\lambda_1, L) = P_1 \cdot \sin^2(\kappa_1 L) = 0 \quad (20)$$

A pro vlnovou délku λ_2 vztah (21)

$$P_2(\lambda_2, L) = P_1 \cdot \sin^2(\kappa_2 L) = P_1 \quad (21)$$

Z těchto rovnic vyplývá, že signál o vlnové délce λ_1 , se nenaváže do druhého vlákna a celý výkon zůstane ve vláknech prvním. Naopak výkon na vlnové délce λ_2 se přenesení celý do druhého vlákna.

3. Výrobní procesy optických děličů

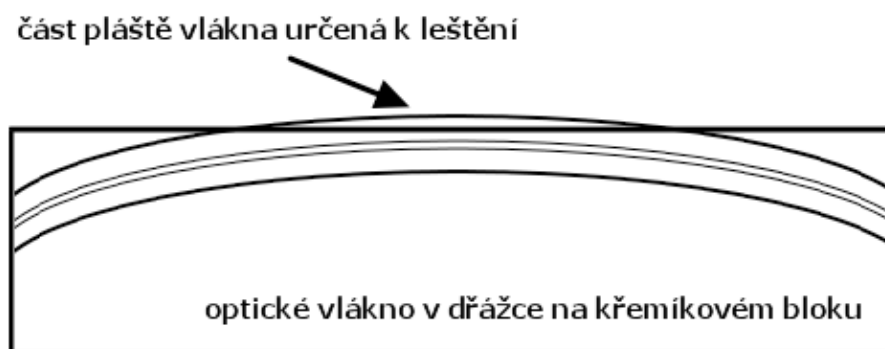
Výroba děličů je možná třemi způsoby:

- ▶ Leštěním
- ▶ Tavením, metoda zvaná FBT (Fused Biconical Tapered Couplers)
- ▶ Planární technologií, PLC (Planar Lighwave Circuit)

V dnešní době se vyrábí děliče hlavně metodou FBT a PLC.

3.1 Výroba pasivních optických děličů leštěním

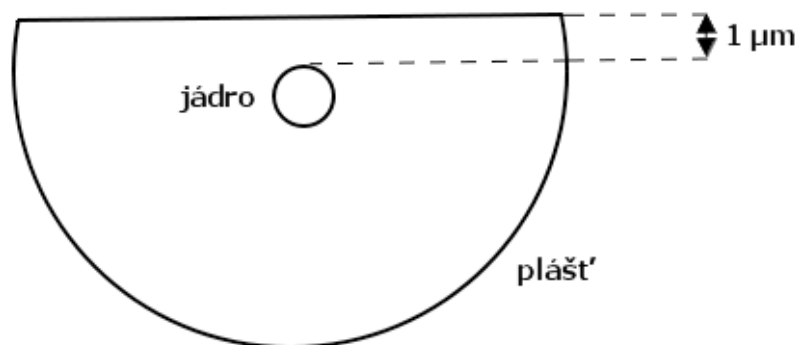
K výrobě děličů leštěním se používá optické vlákno, u kterého se z jedné strany mechanicky obrousí a vyleští plášť vlákna, čímž se odhalí jádro vlákna. K dosažení tohoto je optické vlákno upevněno do zahnuté drážky v křemenném bloku. Drážka v bloku je zahnutá ve středu tak, aby část pláště vlákna vyčnívala nad povrchem bloku (obr. 5). Část vlákna, která vystupuje na povrch, se pak obrousí a vyleští. Tímto způsobem vznikne profil vlákna znázorněný na obr. 6.



Obr. 5: Způsob leštění optického vlákna

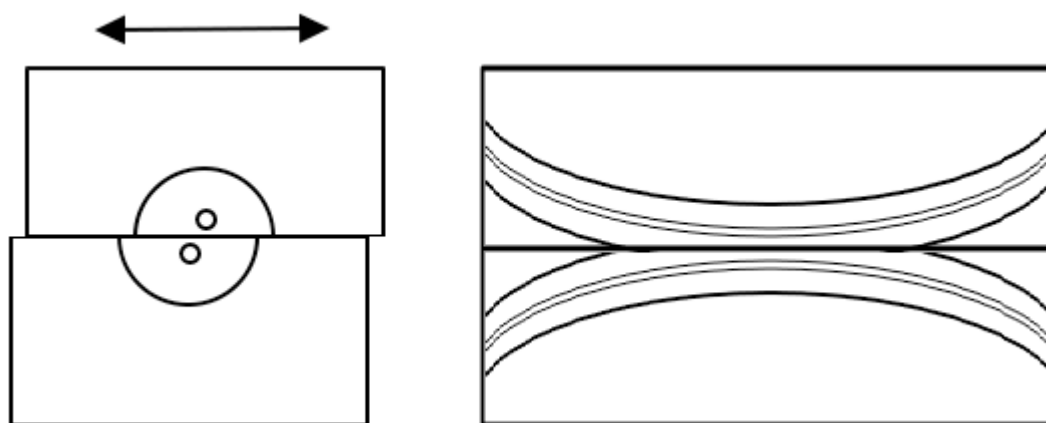
K určení zda je jádro od pláště v dostatečné vzdálenosti, aby docházelo k přenosu výkonu ven z vlákna, se nanáší na odleštěnou část vlákna optický gel s indexem lomu trochu vyšším než je index lomu jádra. Pokud je jádro dostatečně blízko odleštěné části, dochází ve vláknu k výkonovým ztrátám v důsledku vyvázání světla z vlákna.

Pasivní optický dělič vznikne položením dvou křemíkových bloků odleštěnou částí na sebe. Mezi jednotlivé bloky se ještě vkládá optický gel.



Obr. 6: Způsob leštění optického vlákna

Velkou výhodou výroby leštěním je možnost nastavit dělicí poměr děliče, tak že budeme zvětšovat nebo zmenšovat vzdálenost jader vláken od sebe. Toho dosáhneme posouváním dvou křemíkových bloků na sobě jak je to ukázáno na obrázku 7.



Obr. 7: Nastavitelnost děliče

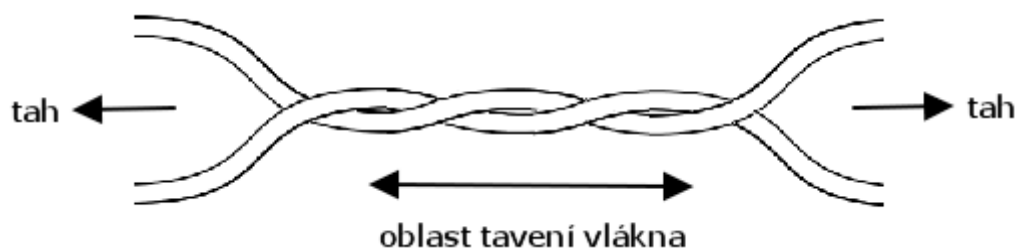
Leštěný dělič se vyznačuje velmi dobrými parametry. Dělicí poměr u tohoto děliče lze nastavit v rozmezí 0 % až 100 % a má velmi vysokou směrovost.

Velkou nevýhodou těchto děličů ovšem může být vysoká závislost na teplotě. Tato závislost je způsobena velkou citlivostí optických gelů na teplotě, které se přidávají mezi leštěné plochy optických vláken. S rostoucí teplotou dochází ke změně indexu lomu gelu a tím i ke změně chování vyvazujícího se světla.

Vyrobené děliče leštěním vykazují sice velmi dobré parametry, ale jejich výroba je velice zdoluhavá, proto se s nimi v praxi nesetkáváme tak často.

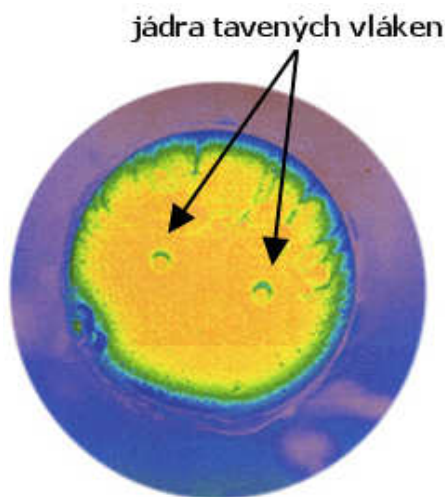
3.2 Výroba děličů tavením

Výroba vlákna tavením je často označována zkratkou FBT (Fused Biconical Tapering). Jednoduchý dělič s dělicím poměrem 1x2 je vyráběn tak, že se vezmou dvě optická vlákna bez ochranných vrstev. Vlákna se smotají tak aby vytvořily oblast, ve které dochází ke kontaktu obou vláken, jak je znázorněno na obr. 8.



Obr. 8: Proces tavení vláken

Kontaktní oblast je zahřívána tak, že dochází k tavení vláken. Zároveň s tavením je na oba konce obou vláken vyvíjen tah, tím dochází k prodlužování, zužování a slučování vláken v oblasti tavení. Během tavení jsou konce vláken monitorovány tak, že až dojde k požadovanému dělicímu poměru je proces tavení a prodlužování zastaven. Výsledný profil vlákna je na obrázku 9.



Obr. 9: Pohled na řez tavenou oblastí^[10]

Většina současných výrobců používá k roztavení vláken teplo dodávané k vláknům plamenem. Hlavní nevýhoda zahřívání vláken plamenem je ta, že plamen je silně závislý na prostředí, ve kterém hoří. Toto prostředí se velmi špatně popisuje a může docházet

k nežádoucím odchylkám. Další nevýhodou je, že plamen může kontaminovat vlákno nežádoucími příměsemi vznikajícími při hoření. Většinou se jedná o vodní výpary, které mohou ovlivnit šířku pásma vlnových délek použitelných při přenosu signálu.

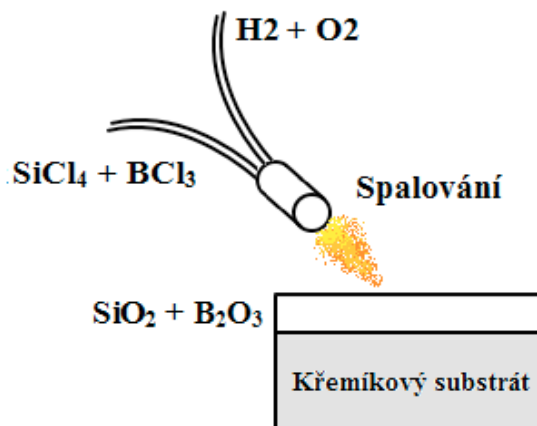
Alternativní metodou zahřívání vlákna je použití CO_2 laseru jako zdroje tepla. CO_2 laser je použit proto, že pracuje na vlnových délkách, při kterých optické vlákno velmi efektivně absorbuje vyzařované světlo.

Výroba děličů pomocí tavení je velmi rozšířeným způsobem, kvůli svojí nenáročnosti a schopnosti celý proces bez větších problémů automatizovat. Tavené děliče jsou velmi rozšířené v LAN sítích a WDM aplikacích.

3.3 Výroba děličů pomocí planární technologie ^{[3], [7]}

Potřeba miniaturizace optických součástek vede k rozvoji integrované optiky. Proces výroby těchto obvodů lze plně automatizovat. Planární technologií lze vytvořit součástky jako děliče, útlumové články, filtry, vlnové multiplexy atd. Základem technologie je nenanášení jednotlivých vrstev na křemíkový substrát. Postup výroby je následující:

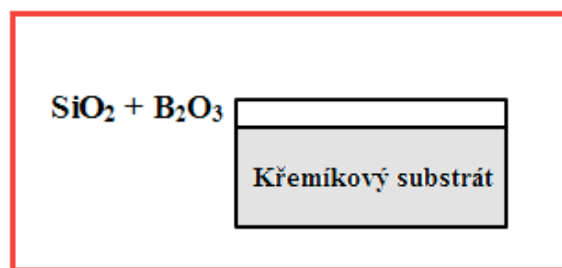
1. Na křemíkový substrát začneme nanášet pomocí technologie plamenné hydrolýzy (FHD – Flame Hydrolysis Deposition) oddělovací vrstvu. Tuto oddělovací vrstvu nanášíme proto, že substrát křemíku má příliš velký index lomu ($n \sim 3,5$), takže kdybychom položili přímo vlnovodnou vrstvu, docházelo by k úniku přenášené vlny z jádra do substrátu. Plamennou hydrolýzou je metoda, při níž spalováním směsí příměsí $\text{SiCl}_4 + \text{BCl}_3$ nebo PCl_4 v kyslíkovodíkovém plameni vznikají malé částičky (SiO_2 a příměsi) usazující se na podložce z křemíkového substrátu (obr. 10). Takto nanesená vrstva by měla mít výšku více než $30 \mu\text{m}$.



Obr. 10: FHD oddělovací vrstvy

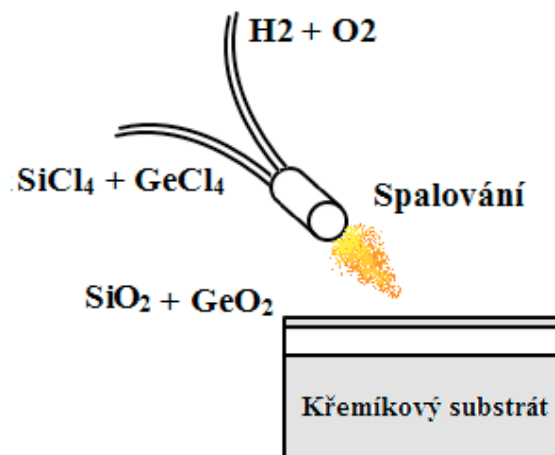
2. Oddělovací vrstva nanesená FHD je velmi pórovitá a pro vlnovodovou strukturu je nepoužitelná. Proto se v druhém kroku provádí žíhání o teplotě 1200 °C až 1300 °C (obr. 11). Při této teplotě dochází k roztavení sazí a jejich slinutí v homogenní vrstvu. Teplota tání křemíkového substrátu je nižší než teplota tání SiO_2 , proto je potřeba teplotu tání SiO_2 snížit. Toho se dosáhne pomocí příměsí BCl_3 nebo PCl_4 do spalování směsi při FHD.

Zahřívání



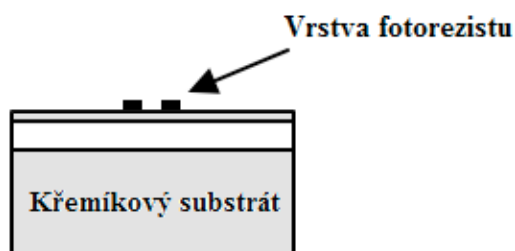
Obr. 11: Žíhání oddělovací vrstvy

3. Pomocí metody FHD je nanesená vlnovodná vrstva (obr. 12). Nyní se do spalující směsi k SiCl_4 přidává GeCl_4 , ze kterého vzniká oxid GeO_2 , který modifikuje index lomu. Pak dochází znovu k žíhání, aby se vrstva druhá srovnala.



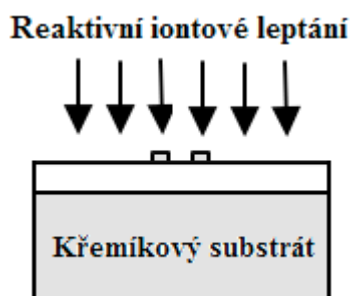
Obr. 12: Žíhání oddělovací vrstvy

4. V dalším kroku se používá fotolitografie, při níž se nanáší vrstva fotorezistu (obr. 13). Právě nanesení vrstvy fotorezistu můžeme ovlivnit vzdálenost vlnovodných jader od sebe a tím i vlastnosti děliče.



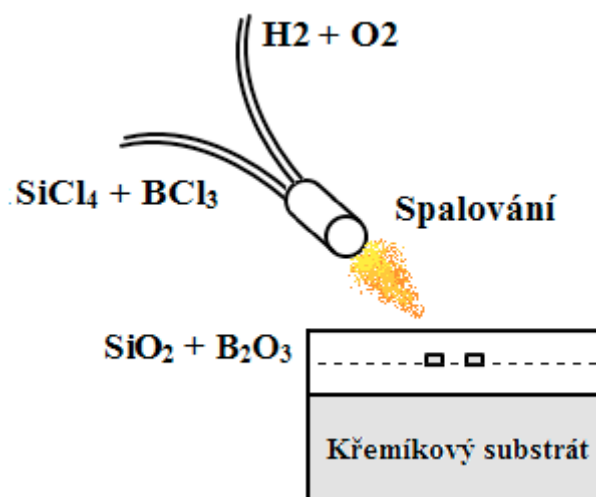
Obr. 13: Fotolitografie

5. Nyní se struktura součástky upravuje reaktivním iontovým leptáním (RIE – Reactive Ion Etching), jedná se o metodu suchého leptání (obr. 14).



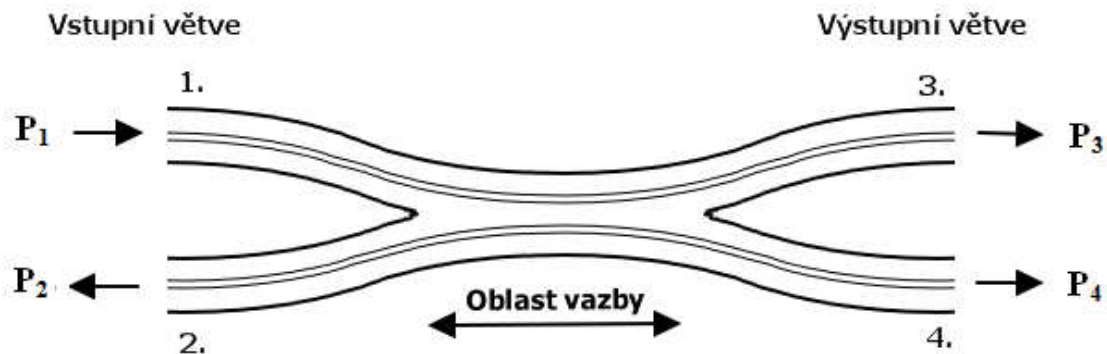
Obr. 14: Reaktivní iontové leptání

6. V posledním kroku se metodou FHD nanese vrstva s příměsí SiO_2 (BCl_3 nebo PCl_4) jako v prvním kroku. Pomocí žíhání se vrstva zarovná. Výsledný profil je na obrázku 15.



Obr. 15: FHD krycí vrstvy

4. Praktické parametry



Obr. 16: Výkony na děliči

V obrázku 16 jsou ukázány jednotlivé větve děliče a výkon v nich. P_1 je výkon vysílaný do větve 1. P_2 je průchozí výkon, P_3 je výkon navázaný do druhého vlákna. P_4 je výkon přeslechu. V ideálním děliči nedochází ke ztrátám, takže nedochází k žádnému přeslechu, tzn. $P_2 = 0$ a $P_1 = P_3 + P_4$.

Výpočty praktických parametrů děliče se realizují podle následujících rovnic:

$$D_P = \frac{P_3}{P_3 + P_4} \cdot 100 \quad (22)$$

D_P je dělicí poměr udávající procentuální hodnotu výkonu ve větvi vůči celkovému výkonu vysílaného do děliče, vypočítává se ze vztahu (22)

$$A_{VL} = 10 \log \frac{P_1}{P_3} \text{ ,nebo } A_{VL} = 10 \log \frac{P_1}{P_4} \quad (23)$$

Vložný útlum A_{VL} se skládá z útlumu dělením + zbytkovým útlumem. Počítá se ze vztahu (23).

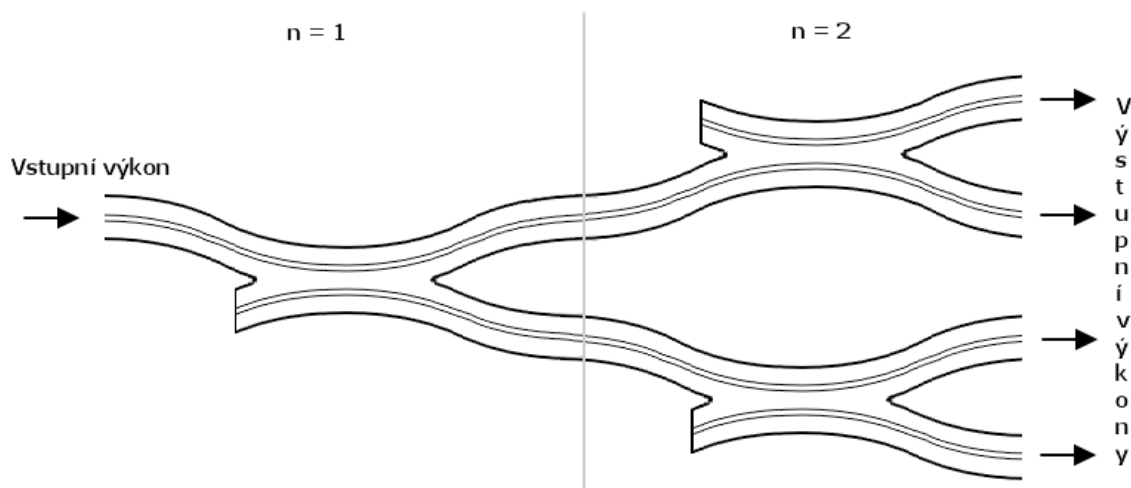
$$A_{ZB} = 10 \log \frac{P_1}{P_3 + P_4} \quad (24)$$

Zbytkový útlum (24) je tvořen nepřesnostmi při výrobě, útlumem samotných vláken, svárem nebo konektory děliče.

$$A_{PR} = 10 \log \frac{P_1}{P_2} \quad (25)$$

Pro správnou funkčnost děliče je žádoucí aby útlum přeslechu A_{PR} (25) byl co největší.

Jelikož je většinou u pasivních optických sítí žádoucí, aby byl výkon do jednotlivých větví rozdělen rovnoměrně, provádí se odhad útlumu dělení podle počtu stupňů kaskádně zapojených Y-článků (obr. 17).



Obr. 17: Struktura děliče 1:4

Při odhadu uvažujeme o tom, že dominantní část útlumu děliče je dána útlumem dělení.

$$A_D = 10 \log_{10} N = n \cdot 10 \cdot \log_{10} 2 \quad (26)$$

Kde N je počet výstupů z děliče a n je počet stupňů Y – článků.

Dělicí poměr (1:N)	1:2	1:4	1:8	1:16	1:32	1:64	1:128
Útlum děliče [dB]	3,9	7,4	10,8	14,1	17,3	18,5	21,7

Tab. 1: Příklad celkového útlumu děliče vzhledem k dělicímu poměru^[2]

Jak je ze vzorce (26) a tabulky (tab. 1) patrné, celkový útlum děliče na jednom výstupu je závislý hlavně na dělicím poměru.

Toto je spíše příklad praktického využití nejčastěji používaných děličů, vytvořených skládáním Y-článků s rovnoměrným dělicím poměrem, sloužící k odhadu celkového útlumu ve větvích. K dosažení přesných hodnot útlumů je třeba využít vztahů z předešlé stránky.

5. Měření útlumu pasivních optických součástek ^[6]

Útlum pasivní optické součástky představuje velikost ztrát výkonu v optické trase způsobený zapojením dané součástky do optické trasy. Tato ztráta optického výkonu se vyjadřuje v decibelové míře. Existuje několik způsobů měření útlumu. Základní dělení je dvojí, a to na skupinu transmisních metod měření útlumu a na metodu zpětného rozptylu.

5.1 Transmisní (přímé) metody měření útlumu

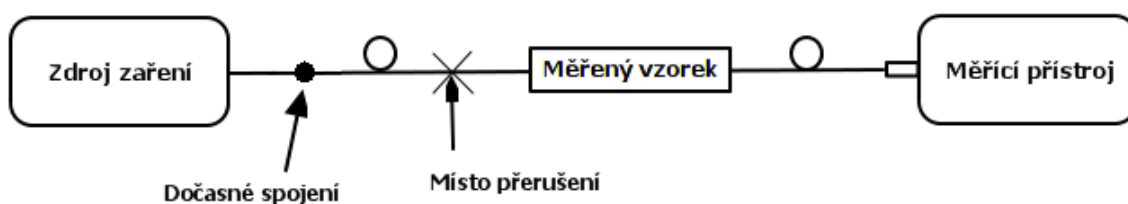
Základem měření útlumu pomocí přímých metod je měření ztráty optického výkonu měřenou optickou součástkou. Měření se provádí ve dvou etapách. Prvně se měří přenášený optický výkon v trase bez pasivní optické součástky. Výsledkem první etapy je získání referenční hodnoty útlumu P_0 . V druhé etapě se do optické trasy přidá měřený prvek a změří se optický výkon P_1 . Útlum způsobený danou součástkou se vypočítá podle vztahu (27).

$$A(\lambda) = 10 \log \frac{P_0}{P_1} \quad (27)$$

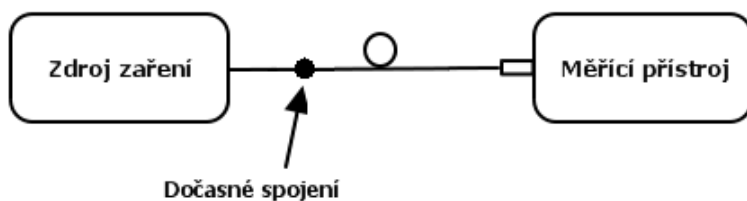
Používají se dva hlavní způsoby měření pomocí transmisní metody, a to: metoda dvou délek a metoda vložných ztrát, která se objevuje ve třech variantách.

5.1.1 Metoda dvou délek

Měření výkonu se součástkou



Měření reference



Obr. 18: Metoda dvou délek

Jedná se nejpřesnější způsob měření útlumu ze všech druhů transmisních metod. Nevýhodou této metody je, že je destrukční nebo částečně destrukční, pokud je vlákno na součástce dostatečně dlouhé. V prvním kroku měření se zapojí součástka do optické trasy a změří se optický výkon P_I . V druhém kroku se vlákno přeřízne před měřenou součástkou a změří se optický výkon P_0 (obr. 18). Při této činnosti se nesmí porušit dočasné spojení.

5.1.2 Metoda vložených ztrát

Metoda vložených ztrát se používá pro pasivní součástky s integrovanými nebo připojenými konektory a její přesnost je limitována kvalitou konektorů. Nejprve se měří reference P_0 poté se do trasy přidá součástka a měří se výkon P_I .

Tato metoda se vyskytuje ve třech variantách:

a) 1a varianta

Při této variantě se používá k měření reference jedno optické vlákno (obr. 19). Do výsledného měřeného útlumu se započítává útlum dvou konektorů.



Obr. 19: Metoda vložených ztrát 1a

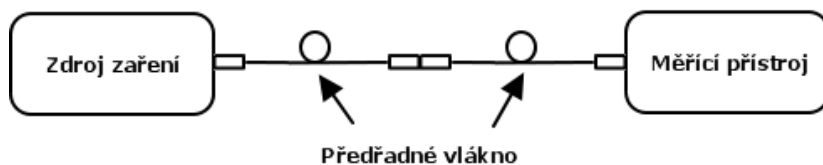
Výsledkem měření metodou 1a je vztah (28).

$$A_{1a} = A_{\text{vzorku}} + 2 \cdot A_{\text{konektoru}} \quad (28)$$

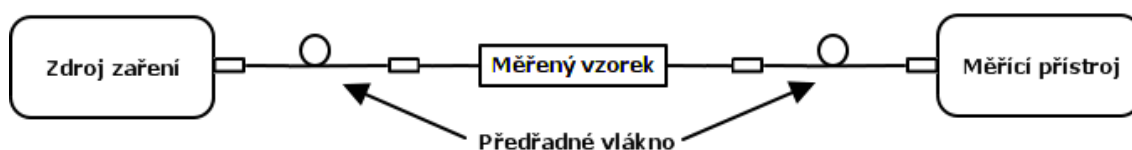
b) 1b varianta

V této variantě se k měření referenčního výkonu používají dvě předřadná vlákna (obr. 20).

Měření reference



Měření výkonu se součástí



Obr. 20: Metoda vložných ztrát 1b

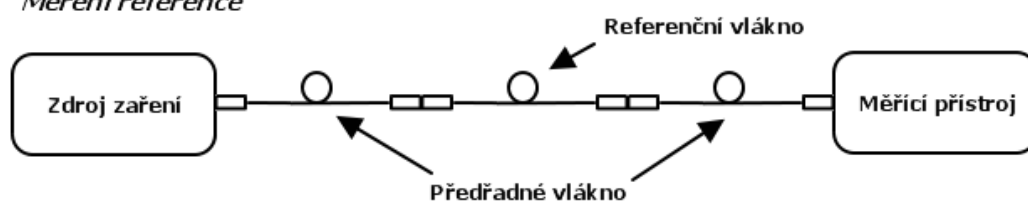
Výsledkem měření metodou 1b je vztah (29).

$$A_{1b} = A_{\text{vzorku}} + A_{\text{konektoru}} \quad (29)$$

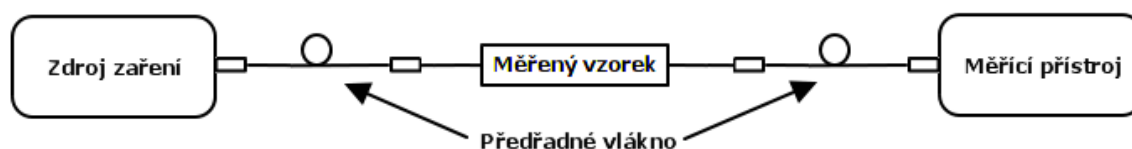
c) 1c varianta

V této variantě se k měření referenčního výkonu používají dvě předřadná vlákna a jedno referenční vlákno (obr. 21).

Měření reference



Měření výkonu se součástí



Obr. 21: Metoda vložných ztrát 1c

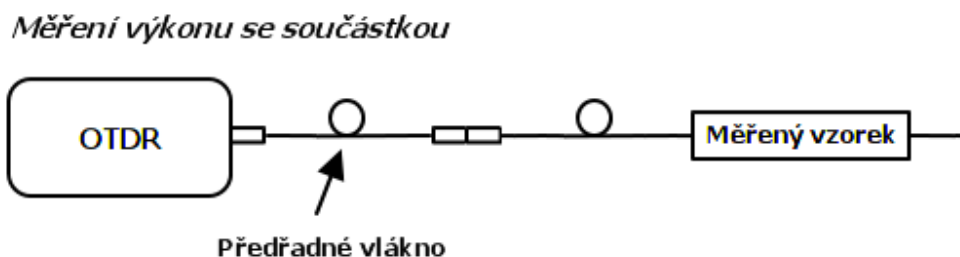
Výsledkem měření metodou 1c je vztah (30). Výhodou varianty 1c je, že nezapočítává útlum měřících konektorů.

$$A_{1C} = A_{\text{vzorku}} \quad (30)$$

K dosažení přesných výsledků je třeba, aby referenční vlákno mělo kvalitní a podobné konektory jako měřený vzorek.

5.2 Metoda zpětného rozptylu (OTDR – Optical Time Domain Reflectometry)

Alternativní metodou k metodě vložných ztrát je metoda vyhodnocování zpětného rozptylu (Rayleighova rozptylu) impulzů signálu posílaných do optické trasy. Měření metodou zpětného rozptylu se používá nejčastěji při výstavbě optické trasy, protože tato metoda umožňuje nejen změřit velikost útlumu součástek (konektorů, poruch), ale také dokáže určit vzdálenost k místu, kde ke ztrátám došlo. Při měření je potřeba před měřenou trasu vložit předřadné vlákno. Délka předřadného vlákna není pevně stanovena a závisí především na šířce impulzů posílaných do vlákna. Zapojení při měření je znázorněno na obrázku 22.



Obr. 22: Metoda zpětného rozptylu

Výstupem měření je nejčastěji graf závislosti útlumu na vzdálenosti. U symetrických součástek je třeba měření provádět z obou stran a výsledky zprůměrovat.

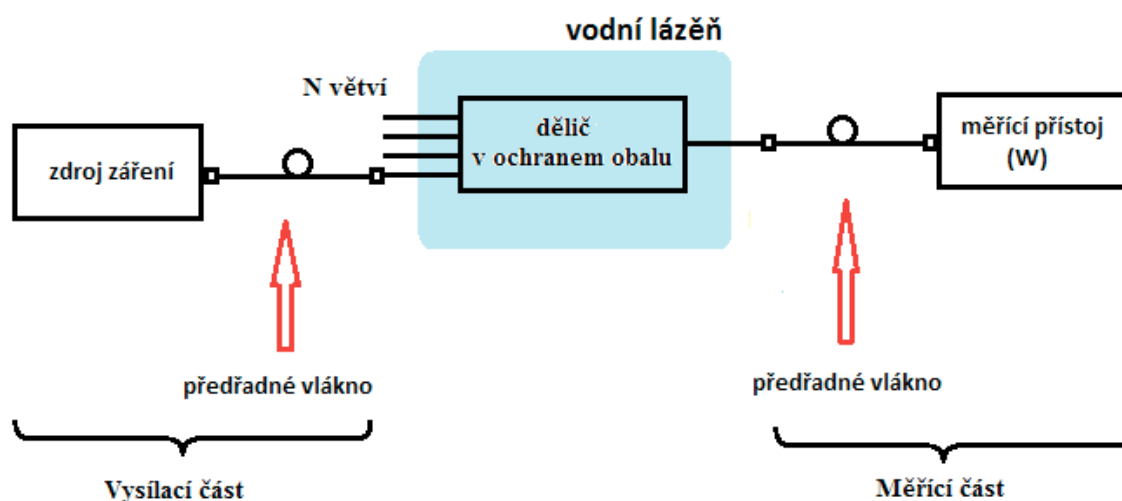
6. Měření

V této části diplomové práce se budu zaměřovat na praktické měření nejdůležitějších veličin u pasivních vláknových optických děličů. Cílem měření bylo zjištění teplotní závislosti jednotlivých parametrů na rostoucí teplotě okolí.

Důvod měření je neznámá závislost přenosových parametru děličů na teplotě. Pasivní optické děliče jsou velmi využívanou součástí pasivních optických sítí. Rozvodné skříně s optickými prvky jsou často umístěny na střeších budov nebo jiných místech, která jsou vystavena měnícím se vlivům počasí a podnebí, např.: slunce, mráz, vítr.

V měření jsou použity čtyři různé optické děliče, každý s jiným počtem větví a jiným dělicím poměrem výkonu. Všechny děliče byly umístěny v ochranném obalu (sáčku) a umístěny do vodní lázně Memmert, ve které se podle potřeby zvyšovala teplota. Ochranný obal zde slouží k tomu, aby nedocházelo k přímému kontaktu vody a měřených děličů.

K měření útlumu byla použita metoda vložných ztrát varianta 1c. Měřené schéma zapojení je na obrázku 23.



Obr. 23: Schéma zapojení

Postup měření byl následující:

- 1) Mezi vysilací a měřicí část zapojíme krátké optické vlákno a změříme referenční P_0 výkon (mW), poté vlákno odpojíme.

- 2) Do vodní lázně umístíme optické děliče.
- 3) Nastavíme teplotu na vodní lázni na 20 °C.
- 4) Na jednu větev děliče připojíme vysílací část, na druhou větev měřicí část a změříme výkon P (mW) ze zdrojové větve 1 do větve 2 pro vlnové délky 1310 nm a 1550 nm
- 5) Měřicí částí postupně změříme výkon u všech větví.
- 6) Poté přepojíme vysílací část na jinou větev a zase změříme měřicí částí výkon na všech ostatních větvích děliče. Toto opakujeme tak abychom vysílací část postupně vystřídali u všech větví děliče.
- 7) Zvýšíme teplotu ve vodní lázni a měření opakujeme. Měříme v rozsahu teplot 20 °C až 100 °C.
- 8) Celý proces měření začíná znova od 20 °C. Jedná se o měření za účelem snížení vlivu chyby měření.

6.1 Použité zdroje

V praktické části měření byly při měření útlumu použity dva rozdílné zdroje optického výkonu (obr. 24 a 25).

► EXFO FLS-300-23BL

Zdroj pracující na vlnových délkách 1310 nm a 1550 nm. Konektor pro připojení je typu SC. Jednalo se o zdroj zapůjčený do školy na dobu určitou za účelem tohoto měření. S tímto zdrojem se měření vlivu teploty provádělo s krokem 5 °C. Z důvodu časové náročnosti měření bylo opakováno čtyřikrát.



Obr. 24: Zdroj EXFO FLS-300

► **NOYES OLS2**

Zdroj pracuje na vlnových délkách 1310 nm a 1550 nm. Konektor pro připojení optického vlákna je typu SC. Jedná se o standardní laboratorní zdroj, kterým je naše škola vybavena.

Měření s tímto zdrojem se provádělo po kroku 10 °C.



Obr. 25: Zdroj NOYES OLS2

6.2 Použité přístroje měřící výkon – NOYES OPM4

K měření výkonu byly použity dva měřicí přístroje NOYES OPM4 (obr. 26):

► **NOEYS OPM4-3D**

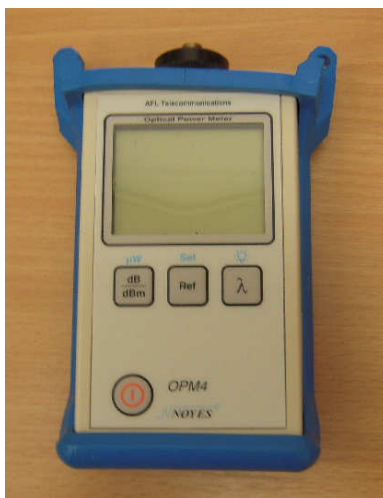
Měřič optického výkonu pracují s InGaAs detektorem. Má schopnost měřit výkon na šesti různých vlnových délkách.

Tento detektor má vstupní SC adaptér. Byl použit pro měření děličů 1:3 a 1:5.

► **NOEYS OPM4-4D**

Měřič optického výkonu pracují s InGaAs detektorem. Má schopnost měřit výkon na sedmi různých vlnových délkách.

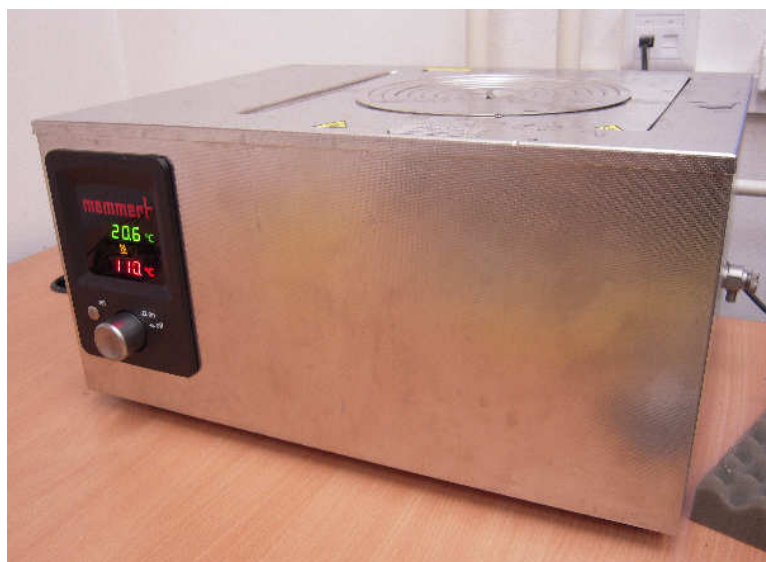
Tento detektor má vstupní FC adaptér. Byl použit pro měření děličů 1:2 a 1:4.



Obr. 26: Použitý měřič výkonu NOYES OPM4

6.3 Vodní lázeň

Pro simulování podmínek zvyšující se teploty byla použita vodní/olejová lázeň MEMMERT ONE7 (obr. 27). Obsah lázně se dá zahřívat v rozsahu $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+200\text{ }^{\circ}\text{C}$, což plně vyhovovalo požadavkům měření, které se provádělo v rozsahu teplot $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Zařízení disponuje rovněž měřičem teploty obsahu lázně s přesností $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Obr. 27: Vodní/olejová lázeň MEMMERT ONE7

6.4 Měření teploty

Měření teploty se provádělo proto, aby bylo zajištěno, že se celý měřený vzorek zahřívá konstantně a že se v lázni nenachází místa s výrazným rozdílem teploty, což by mohlo ovlivnit naměřené výsledky výkonů. K měření byly použity tři měřicí přístroje, z nichž každý byl umístěn na jiném místě ve vodní lázni.

a) Vodní/olejová lázeň MEMMERT ONE7

Jednalo se o směrodatné měření teploty, což znamená, že pokud vodní lázeň ukázala určitou teplotu, např. $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, začalo se s odečítáním výkonů v optickém měřicím obvodu.

b) Digitální teploměr Testo 720

Laboratorní teploměr pro měření teplot v rozsahu $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+800\text{ }^{\circ}\text{C}$. Přesnost měření v požadovaném měřicím rozsahu teplot, tedy $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$, je deklarována výrobcem na $\pm 0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Použitý měřicí přístroj je na obr. 28. Umístění měřicí sondy přístroje je znázorněno na obr. 30.



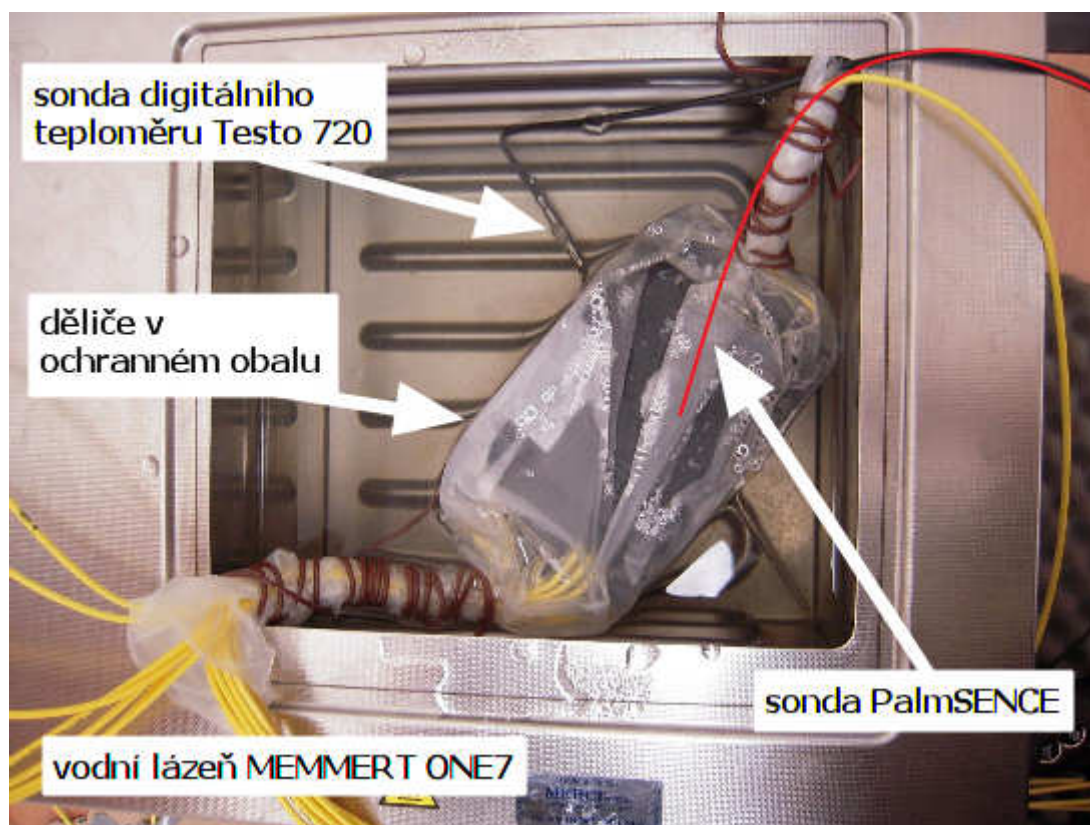
Obr. 28: Digitální teploměr Testo 720



Obr. 29: Měřič teploty PalmSENCE

c) PalmSENCE

Digitální měřič teploty založený na opticko-senzorickém principu. Umožňuje měřit teplotu v rozsahu $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+350\text{ }^{\circ}\text{C}$. Přesnost měření deklarovaná výrobcem je $\pm 0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vzhledem k malým rozměrům měřicí sondy (rozměr optického vlákna), byla tato sonda umístěna mezi měřené děliče, které byly umístěny v ochranném obalu, znázornění je na obr. 30. Použitý měřicí přístroj je na obr. 29.



Obr. 30: Umístění sond k měření teploty

Před každým měřením optického výkonu v zapojení, je nutné obsah vodní lázně přivést do určité teploty. Tato teplota se před každým měřením odečetla ze všech tří měřících přístrojů a zapsala do tabulky. Průměrné naměřené hodnoty jsou v tabulce 2.

Z výsledku měření je patrné, že nejvyšší odchylka naměřených teplot od směrodatné teploty je při měření na teplotě $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$, což se dá vysvětlit nedostatečným utěsněním vodní lázně a s tím spojené unikání tepla v podobě odpařovaných par. Kryt vodní lázně neizoloval soustavu dokonale a to proto, že bylo třeba nechat dostatečné místo na vývod kabelů.

Z naměřených výsledků v tabulce 2 je patrné, že nedocházelo k výraznějším výkyvům teplot v lázni. Z toho vyplývá, že zvolený obal, který měl chránit děliče před kontaktem s vodou, neměl vliv na výsledky měření.

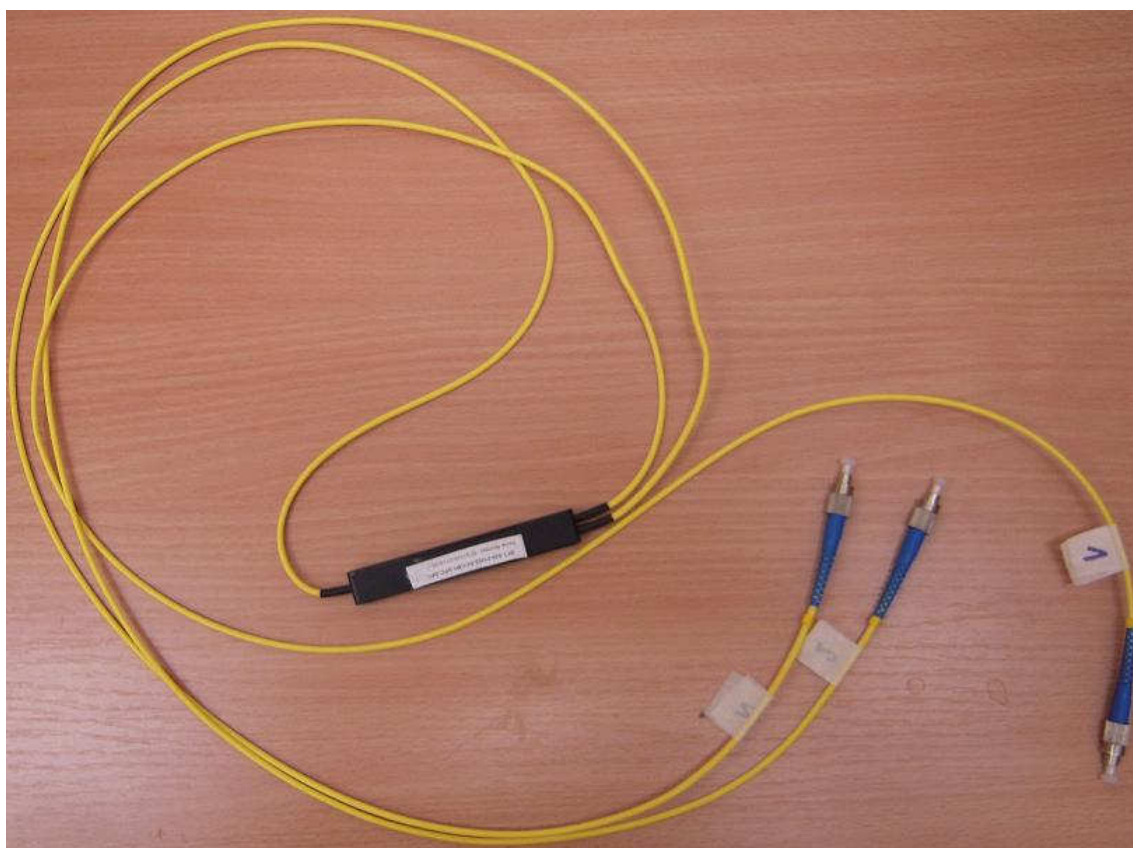
Teplota (° C)					
Zdroj 1			Zdroj 2		
Memmert	PalmSENCE	testo 720	Memmert	PalmSENCE	testo 720
20	20,71	19,9	20	20,77	20,2
25	25,68	24,9	30	30,62	30,2
30	30,84	30,5	40	40,28	39,9
35	35,86	35,3	50	48,53	48,1
40	40,44	39,8	60	60,73	60,3
45	45,78	45,2	70	70,83	70,6
50	50,73	50	80	80,43	79,6
55	55,47	53,6	90	90,26	89,5
60	60,66	59,9	100	99,03	99
65	65,07	65,4			
70	70	69,6			
75	75,11	74,6			
80	80,07	80,1			
85	85,1	85,2			
90	90,1	90,1			
95	94,26	94,4			
100	98,55	98,8			

Tab. 2: Měření teploty – průměr všech měření

7. Použité děliče

Pro potřeby měření byly použity čtyři pasivní děliče:

- a) *Dva pasivní děliče od firmy Optokon* ^{[8], [9]}
- *Pasivní dělič SFT-S35-01x01-50-CM1-SPC-SPC*



Obr. 31: Použitý dělič 1x2

Jedná se o dělič vytvořený fúzní technologií (tavením). Dělicí poměr udávaný výrobcem by měl být 1:2, tzn. 50 % výkonu do každé větve, jedná se o symetrický dělič. Tento dělič je jednomódový a je navrhnut pro pracovní vlnové délky 1310 nm a 1550 nm. Konektory tohoto děliče jsou typu FC, proto bylo při měření reference použito referenční vlákno s FC konektory. Jako měřič výkonu byl použit přístroj NOEYS OPM4-4D a předřadné vlákno u zdroje mělo konektory na jedné straně typu FC a na straně ke zdroji typu SC, jelikož zdroje byly opatřeny pouze adaptéry SC. Výrobce deklaruje parametry děliče pro teploty – 40 °C až 70 °C. Použitý dělič je na obrázku 31.

- *Pasivní dělič SFT-35-01x04-25-CM3-SPC-SPC*



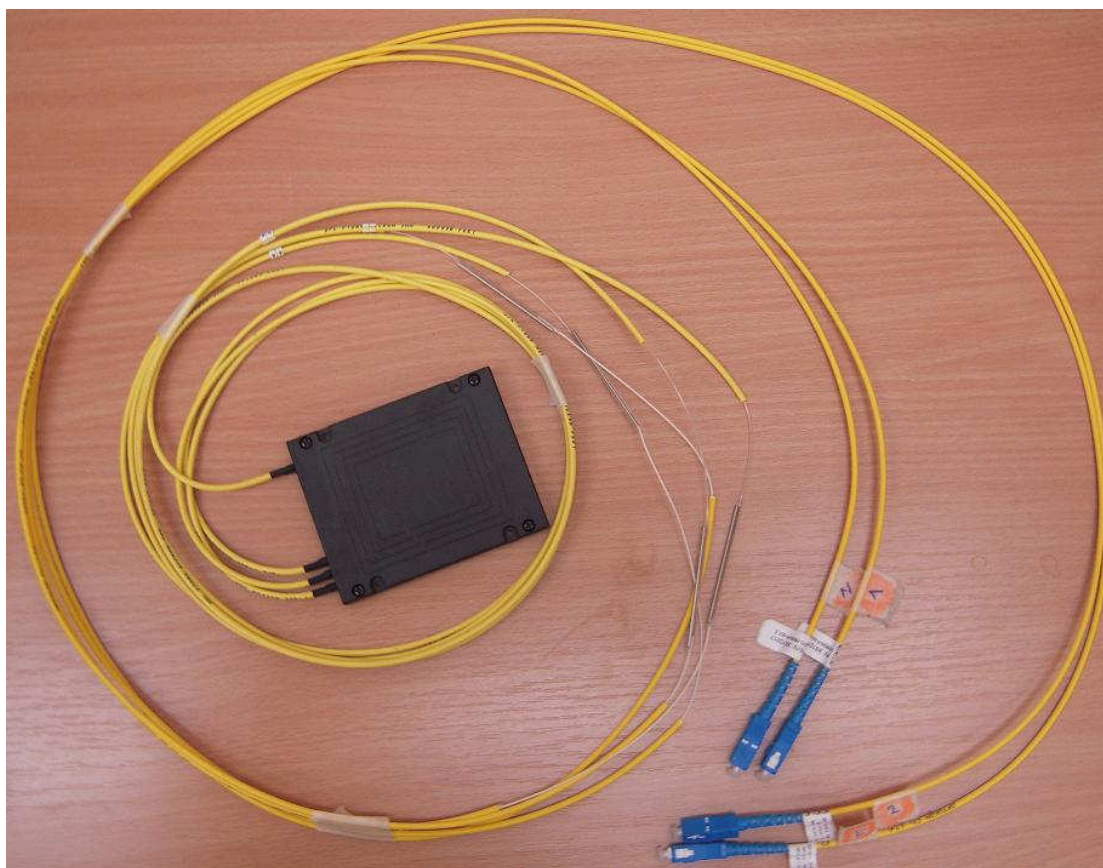
Obr. 32: Použitý dělič 1x4

Také se jedná o dělič vyrobený technologií tavením. Jedná se o symetrický dělič s dělicím poměrem 1x4, pro pracovní vlnové délky 1310 nm a 1550 nm. Výrobce deklaruje parametry děliče pro teploty – 40 °C až 70 °C. Použitý dělič je na obrázku 32.

Je vybaven konektory typu FC, tedy pro něj platí stejný postup při měření reference jako u děliče 1x2.

b) *Dva pasivní děliče od firmy SQS vláknová optika*

- *Pasivní dělič 1x3*



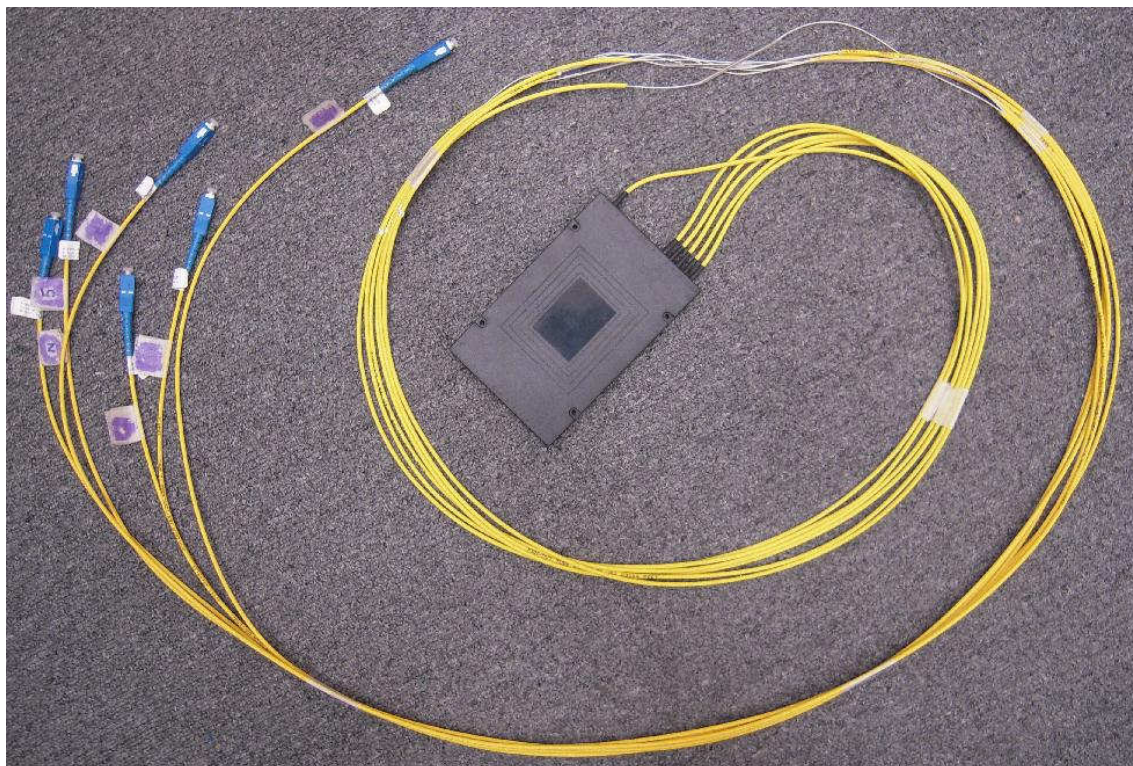
Obr. 33: Použitý dělč 1x3

Jedná se o nesymetrický dělč určený pro pracovní délky 1310 nm a 1550 nm. K tomuto dělči byly před měřením připojeny sváření pigtaily s SC konektory. Proto, že je použito konektoru SC, jsou využity jiné komponenty při měření referenčního výkonu. Předřadná vlákna i referenční vlákno jsou opatřeny konektory SC po obou koncích vláken. Byla rovněž použita jiná varianta měřiče výkonu a to přesně NOEYS OPM4-3D. Udaný dělicí poměr je vyjádřen tabulkou 3. Použitý dělč je na obrázku 33

větve	Výkon v %	
	1310 nm	1550 nm
1	45,9	48,0
2	31,0	29,8
3	23,1	22,2

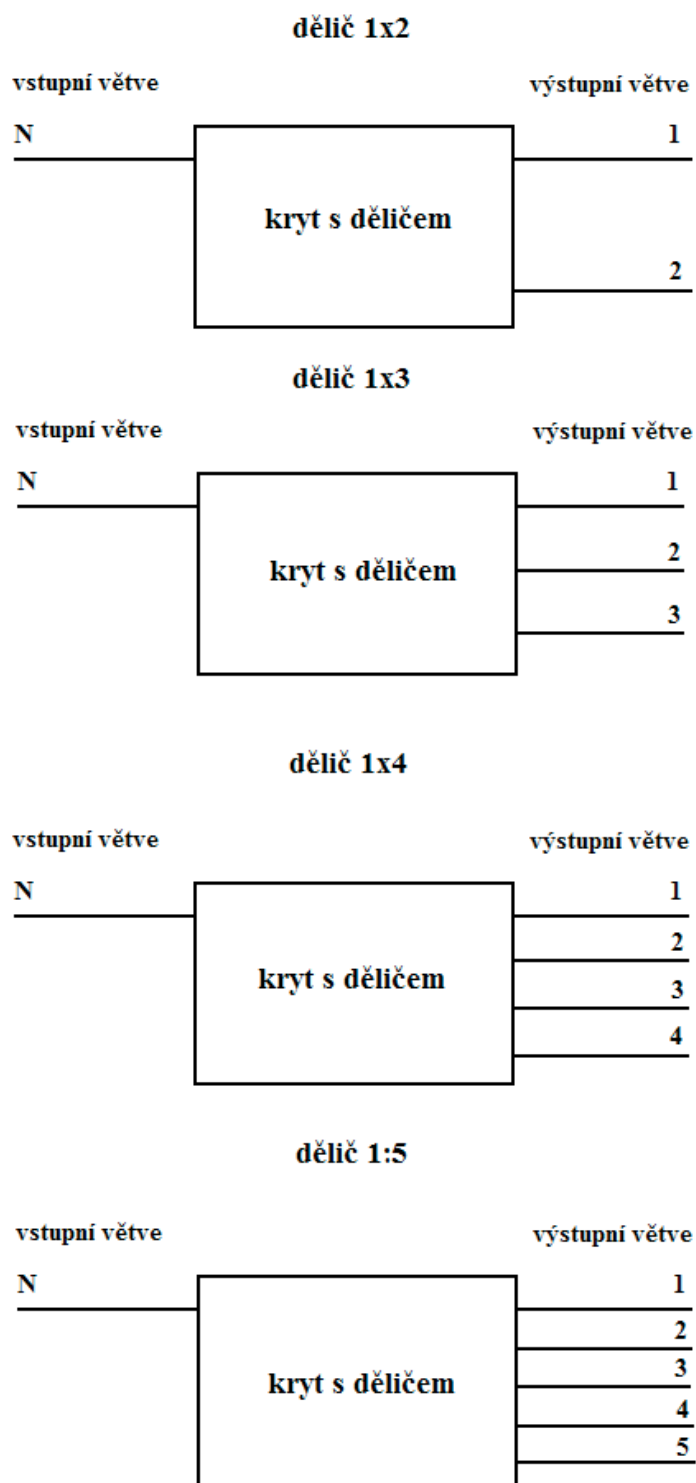
Tab. 3: Dělicí poměr dělče 1x3

- *Pasivní optický dělič 1x5*



Obr. 34: Použitý dělič 1x5

Jedná se nesymetrický pasivní dělič, jehož dělící poměr nebyl před měřením přesně znám. Součástka je určená pro pracovní délky 1310 nm a 1550 nm. I k jednotlivým větvím tohoto děliče bylo třeba nejprve připojit sváření pigtaily s konektory SC. Proto byl při měření referenčních hodnot použit stejný měřic optického výkonu a stejné předřadné a referenční vlákna jako u děliče 1x4. Použitý dělič je na obrázku 34.



Obr. 35: Schéma děličů při měření, toto označení větví je používáno dále v tabulkách. *N* je u všech děličů označována vstupní větev tohoto zapojení.

8. Naměřené a vypočtené výsledky

K prezentaci výsledku jsou, vzhledem k velkému množství naměřených dat, prezentovány výsledky naměřené na děliči OPTOKON SFT-35-01x04-25-CM3-SPC-SPC při použití zdroje optického výkonu EXFO FLS-300-23BL. Tento dělič byl použit proto, že jsou známy parametry deklarované výrobcem, stejně jako způsob výroby. A také proto, že je výkon dělen do většího počtu větví, poměr dělení je 1x4.

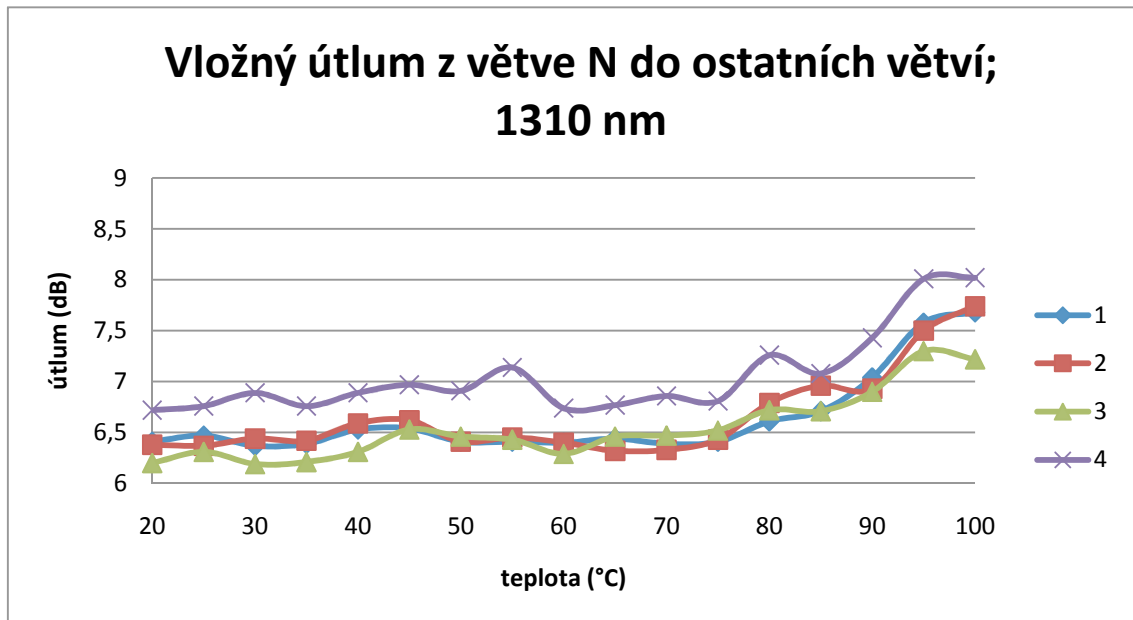
Ze vztahů (22), (23), (24) a (25) jsou dopočteny hodnoty vložných útlumů, útlumů přeslechů, celkových útlumu a dělicích poměrů. K prezentaci výsledků jsem se rozhodl použít medián výsledků z jednotlivých měření. Aritmetický průměr malého počtů měření může být ovlivněn odlehlým měřením. V příloze je tabulka rozdílů výsledků mezi aritmetickým průměrem a mediánem. Tato tabulka ukazuje, že rozdíly v případě tohoto děliče jsou minimální.

V následujících grafech je použito označení větví podle obrázku. 35, tzn. vstupní větev, ze které se výkon dále vyvazuje, je označována písmenem N. Ostatní větve jsou označeny čísly 1, 2, 3 a 4.

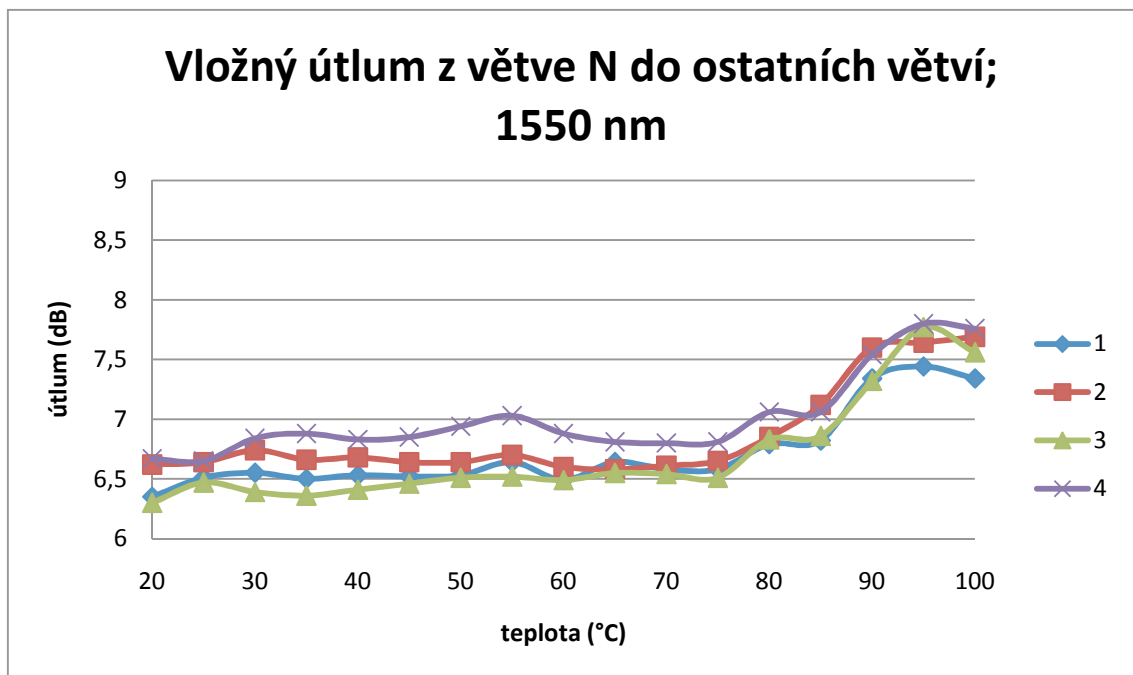
Prezentace naměřených výsledků (graf 1 až 15)

8.1 Vložný útlum

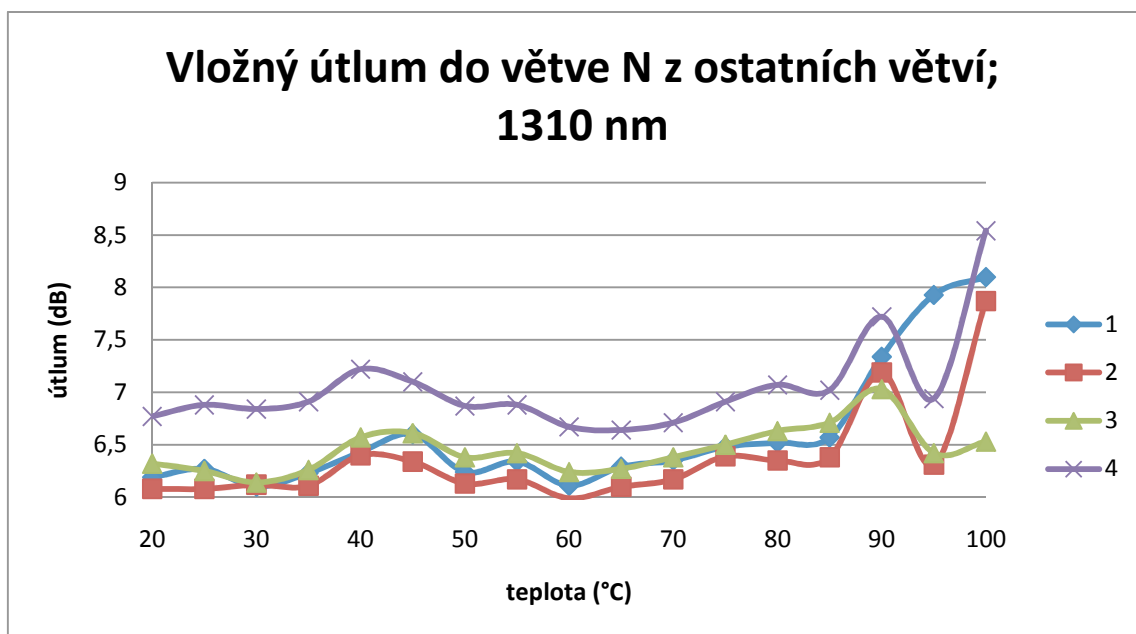
V následujících grafech se jedná o spojení posloupnosti bodů podle teploty.



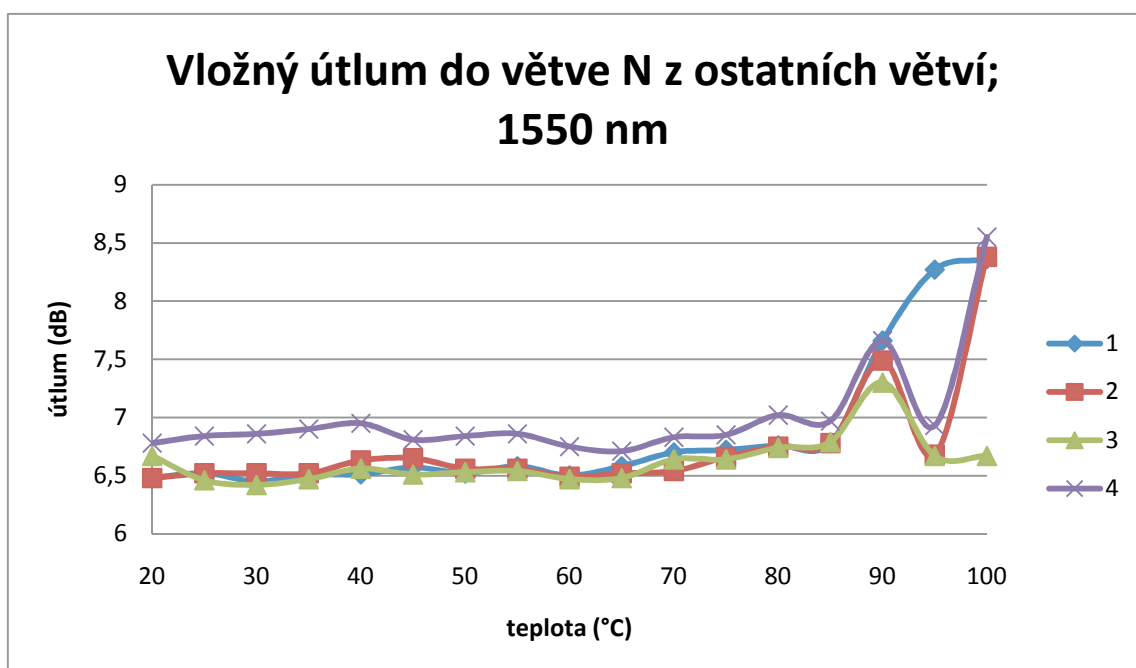
Graf. 1: Vložný útlum z větve N do ostatních větví, při pracovní vlnové délce 1310 nm



Graf. 2: Vložný útlum z větve N do ostatních větví, při pracovní vlnové délce 1550 nm

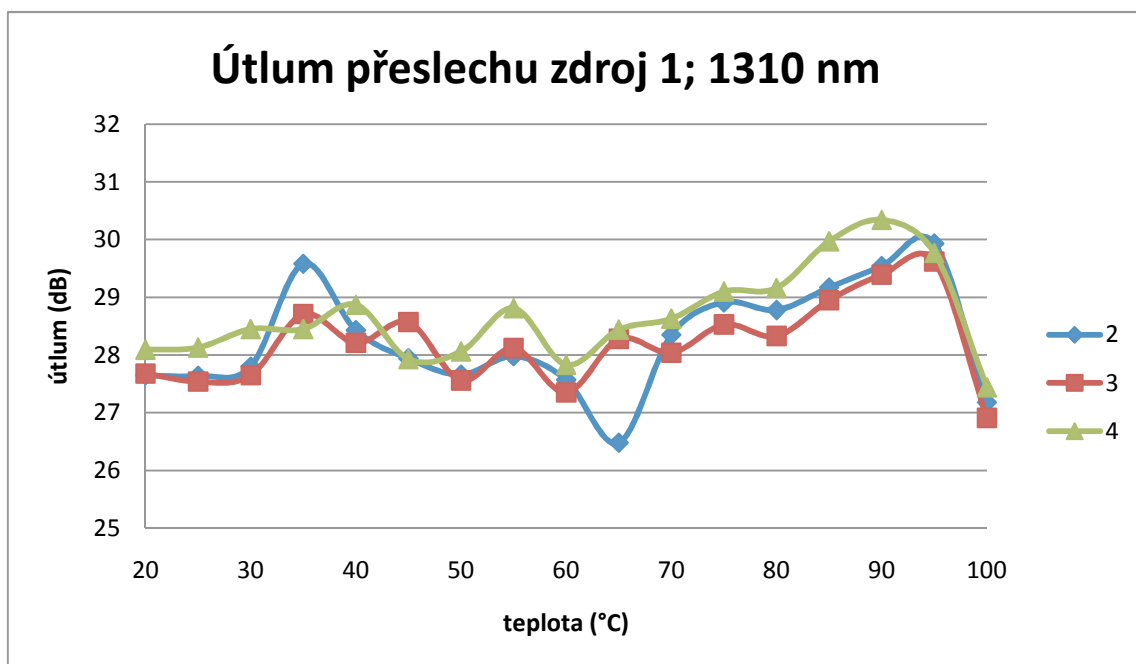


Graf 3: Vložný útlum do větve N z ostatních větví, při pracovní vlnové délce 1310 nm

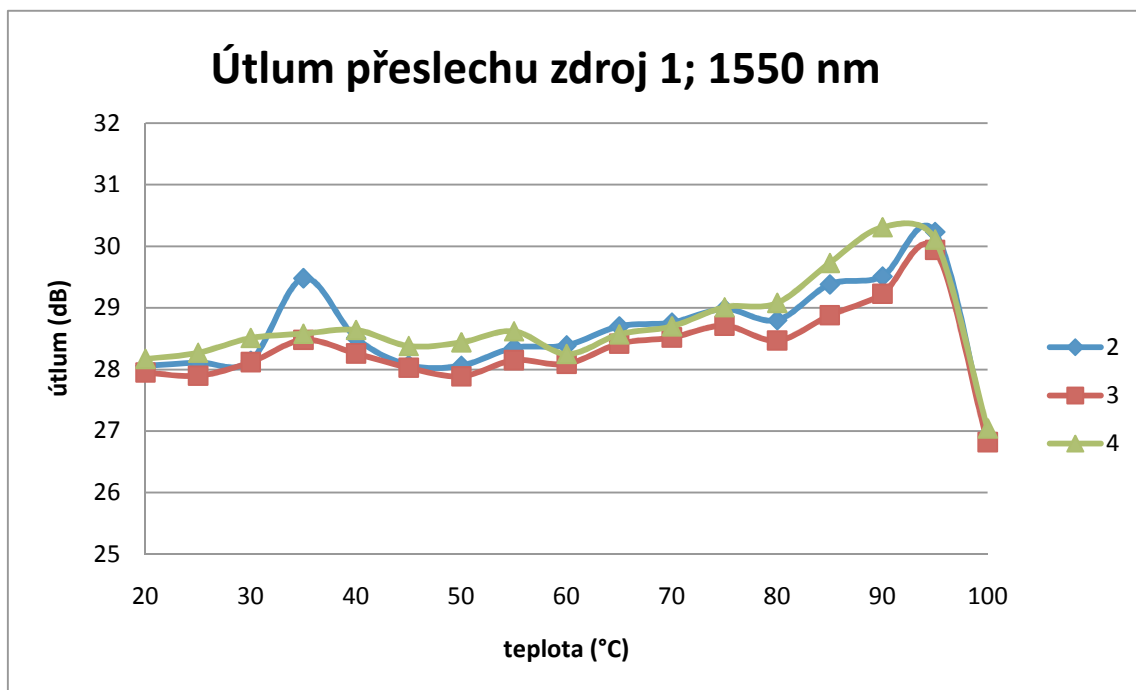


Graf 4: Vložný útlum do větve N z ostatních větví, při pracovní vlnové délce 1550 nm

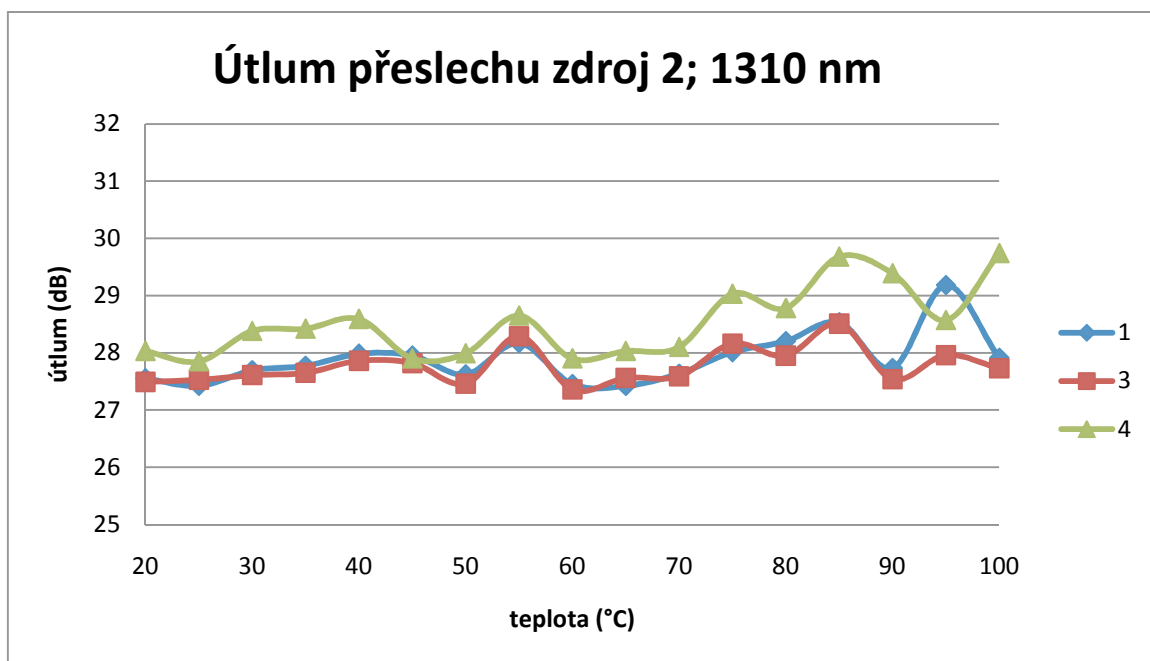
8.2 Útlum přeslechu



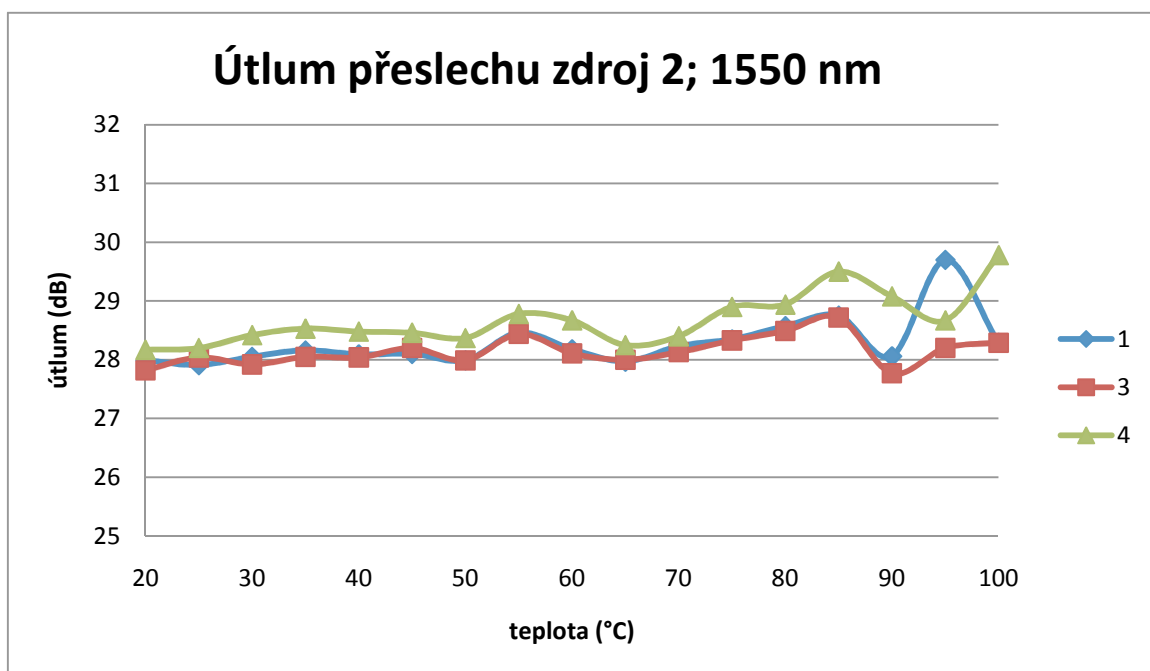
Graf 5: Útlum přeslechu do ostatních větví, zdroj napojen na větev 1, při pracovní vlnové délce 1310 nm



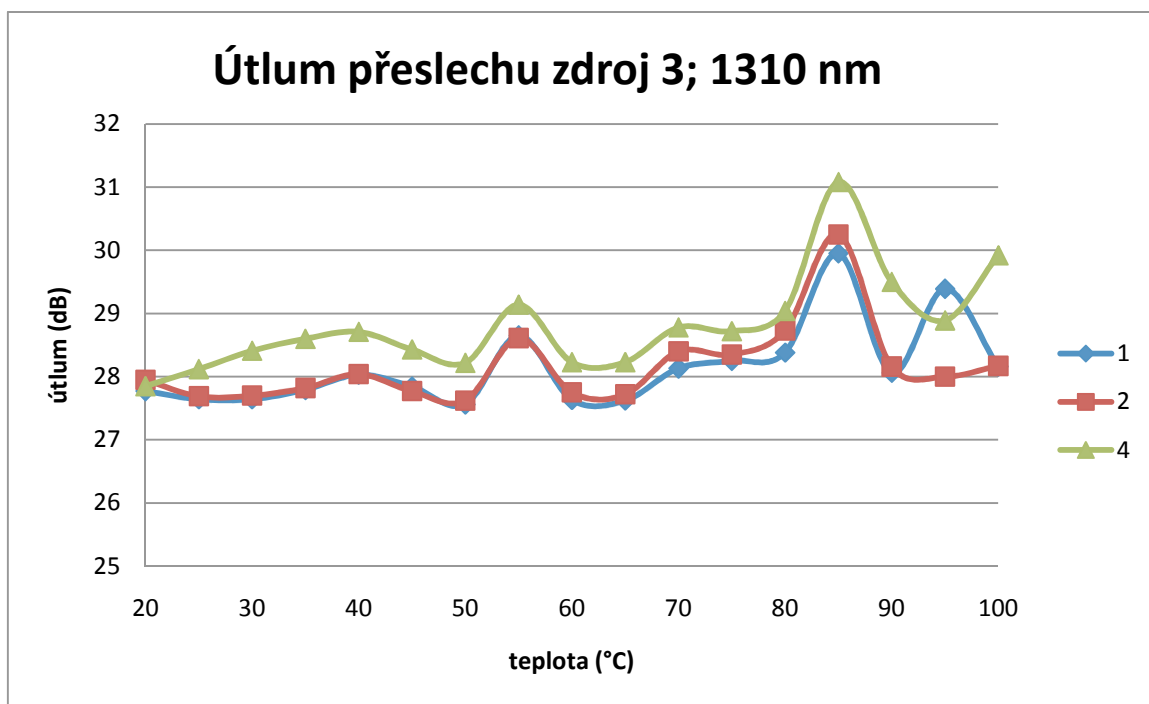
Graf 6: Útlum přeslechu do ostatních větví, zdroj napojen na větev 1, při pracovní vlnové délce 1550 nm



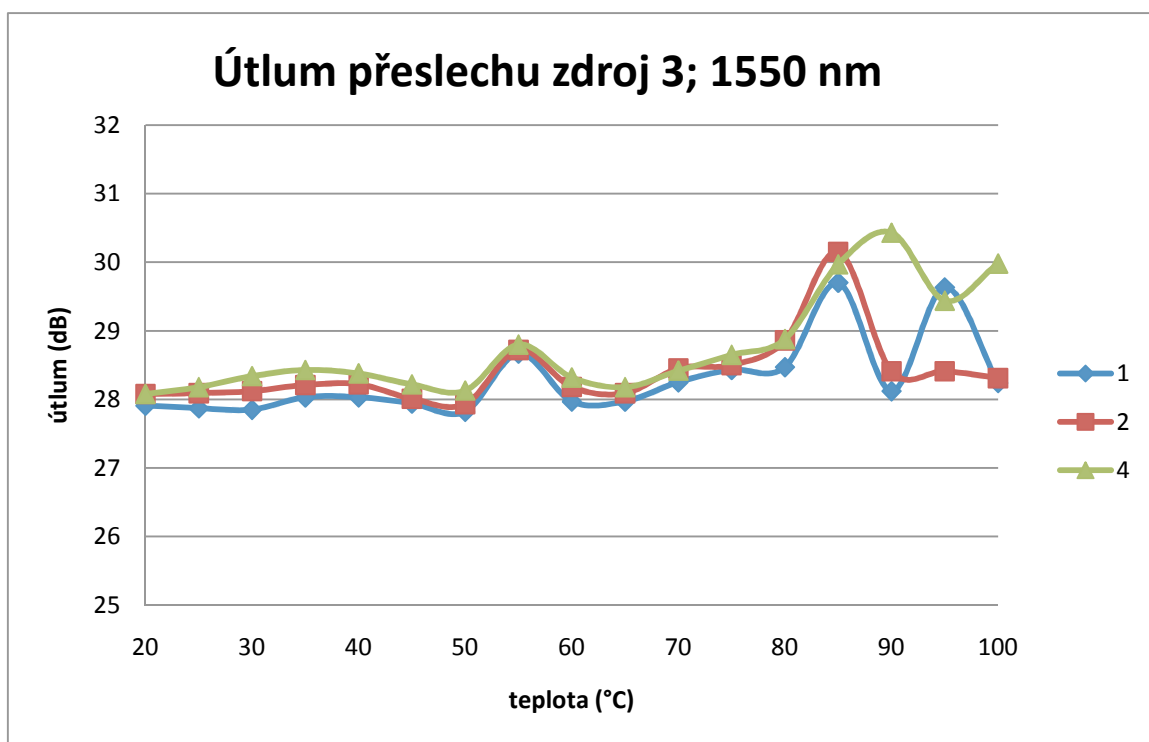
Graf 7: Útlum přeslechu do ostatních větví, zdroj napojen na větev 2, při pracovní vlnové délce 1310 nm



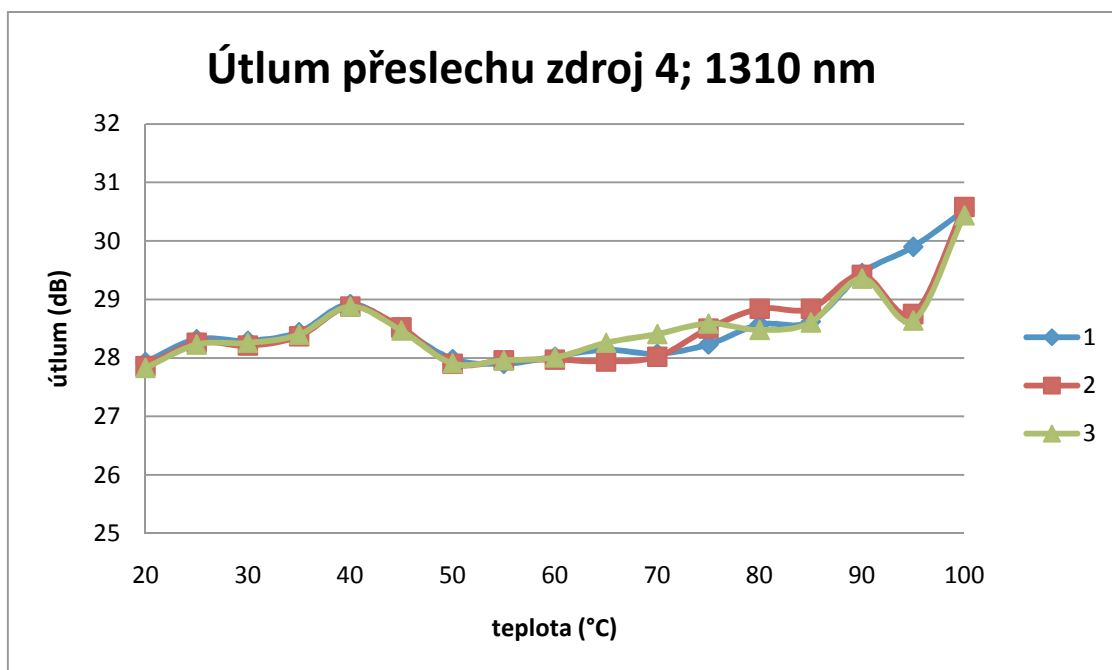
Graf 8: Útlum přeslechu do ostatních větví, zdroj napojen na větev 2, při pracovní vlnové délce 1550 nm



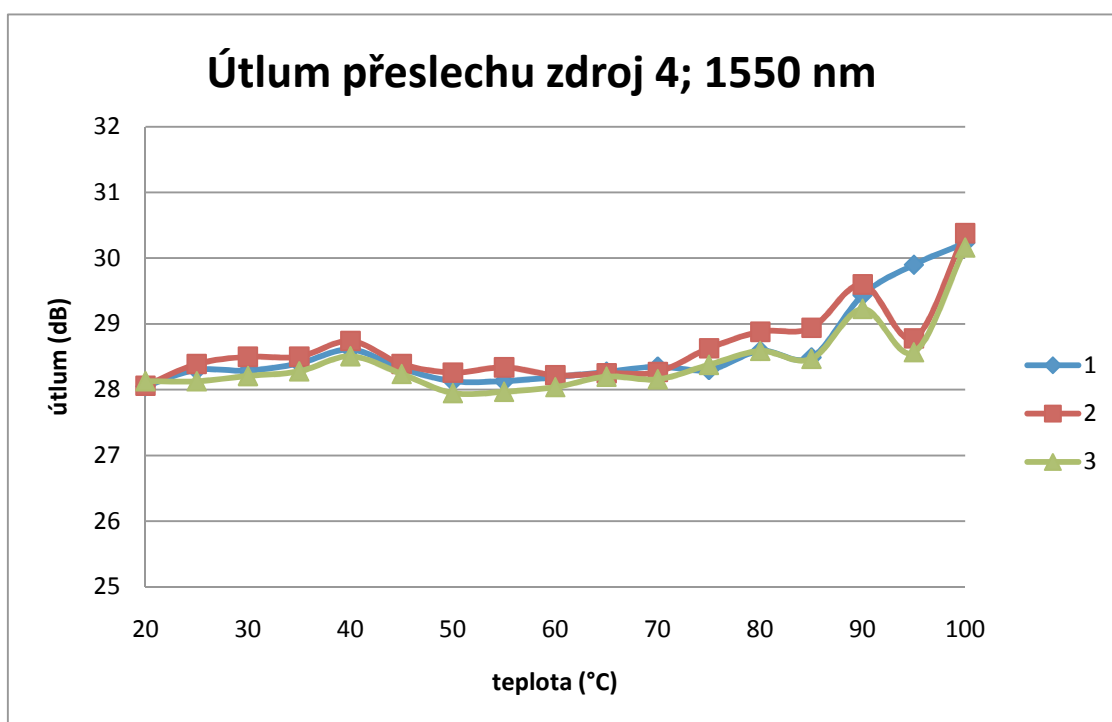
Graf 9: Útlum přeslechu do ostatních větví, zdroj napojen na větev 3, při pracovní vlnové délce 1310 nm



Graf 10: Útlum přeslechu do ostatních větví, zdroj napojen na větev 3, při pracovní vlnové délce 1550 nm

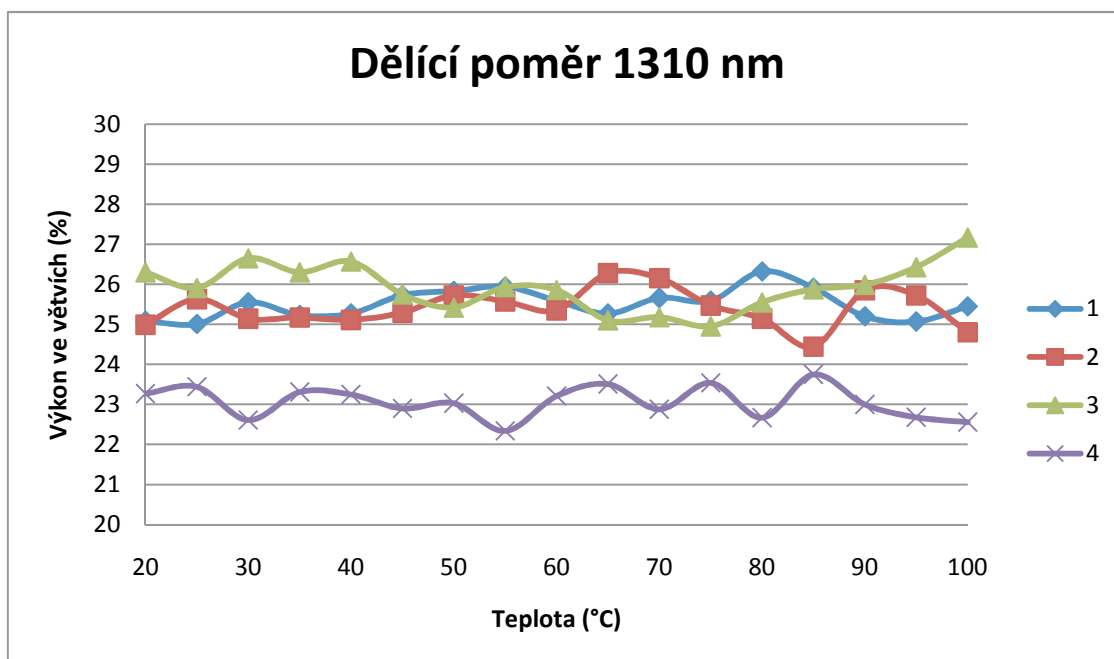


Graf 11: Útlum přeslechu do ostatních větví, zdroj napojen na větev 4, při pracovní vlnové délce 1310 nm

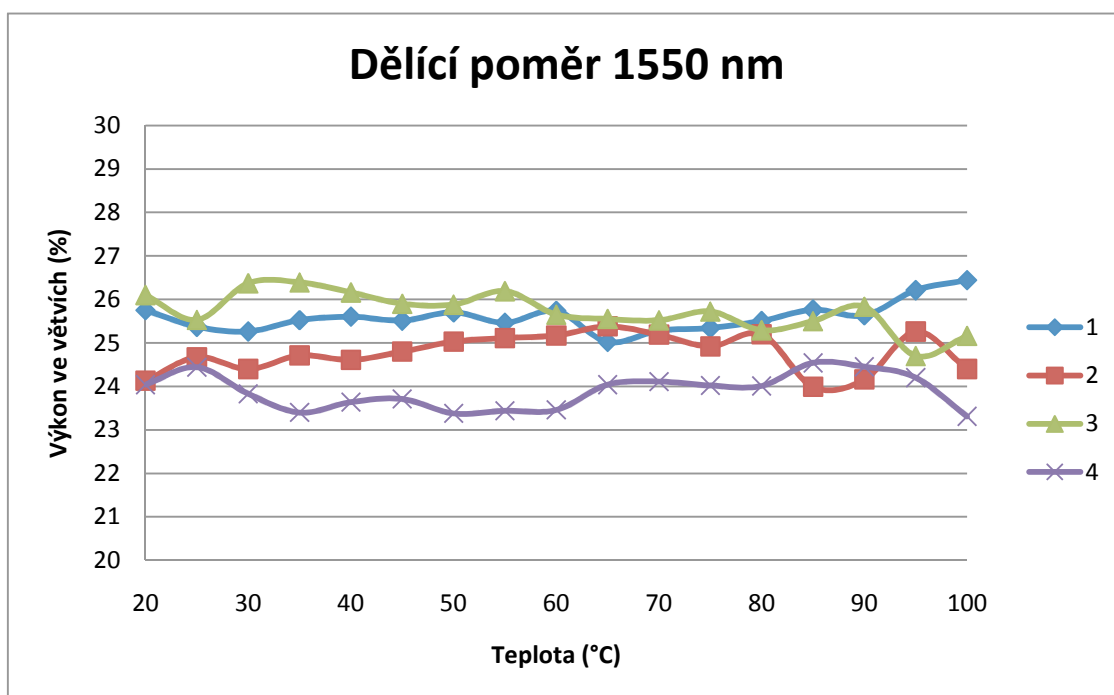


Graf 12: Útlum přeslechu do ostatních větví, zdroj napojen na větev 4, při pracovní vlnové délce 1550 nm

8.3 Dělicí poměr

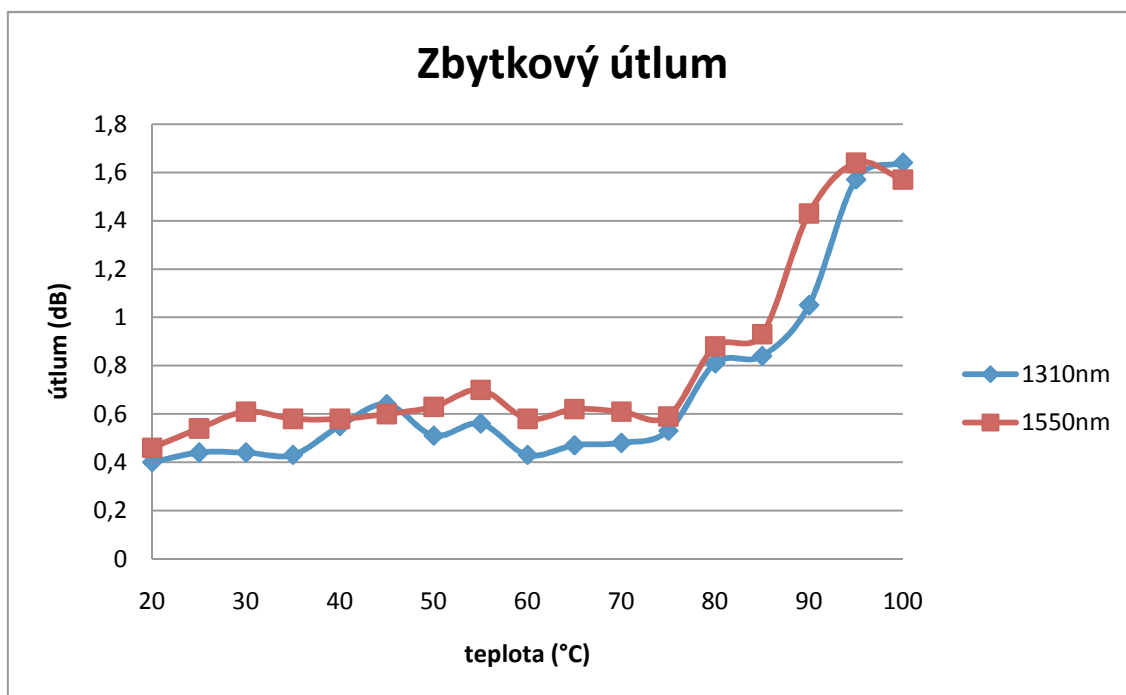


Graf 13: Dělicí poměr výkonu do jednotlivých větví při pracovní délce 1310 nm



Graf 14: Dělicí poměr výkonu do jednotlivých větví při pracovní délce 1550 nm

8.4 Zbytkový útlum



Graf 15: Závislost zbytkového útlumu na teplotě

V grafu závislosti zbytkového útlumu na teplotě je patrné zvyšování zbytkového útlumu při teplotách nad 70 °C. Vzhledem k vyšším hodnotám výběrové směrodatné odchylky jednoho měření i směrodatné odchylky výběrového průměru všech měření^[4] obzvláště v oblasti nad 70 °C (až 0,6 dB v 100 °C), není provedena regresní analýza zbytkového útlumu. Hodnoty odchylek jsou v příloze. Patrné je, že vložný útlum v oblasti garantované výrobcem (- 40 °C až + 70 °C), nedochází k výrazným výkyvům útlumu a jeho hodnota se pohybuje okolo hodnot 0,6 dB pro 1550 nm a 0,5 dB pro 1310 nm. V oblasti nad 70 °C dochází k nárůstu útlumu, avšak nelze určit jeho strmost vzhledem k chybě měření v tomto úseku.

9. Analýza naměřených a vypočtených hodnot ^[5]

Pro vyhodnocení závislosti daných parametrů na teplotě byla použita regresní analýza. Základem regresní analýzy je vystižení vhodné matematické funkce k vyjádření sledované závislosti a proložení množiny bodů hladkou matematickou křivkou, jejíž rovnice by vystihovala sledované parametry v závislosti na proměnné teplotě.

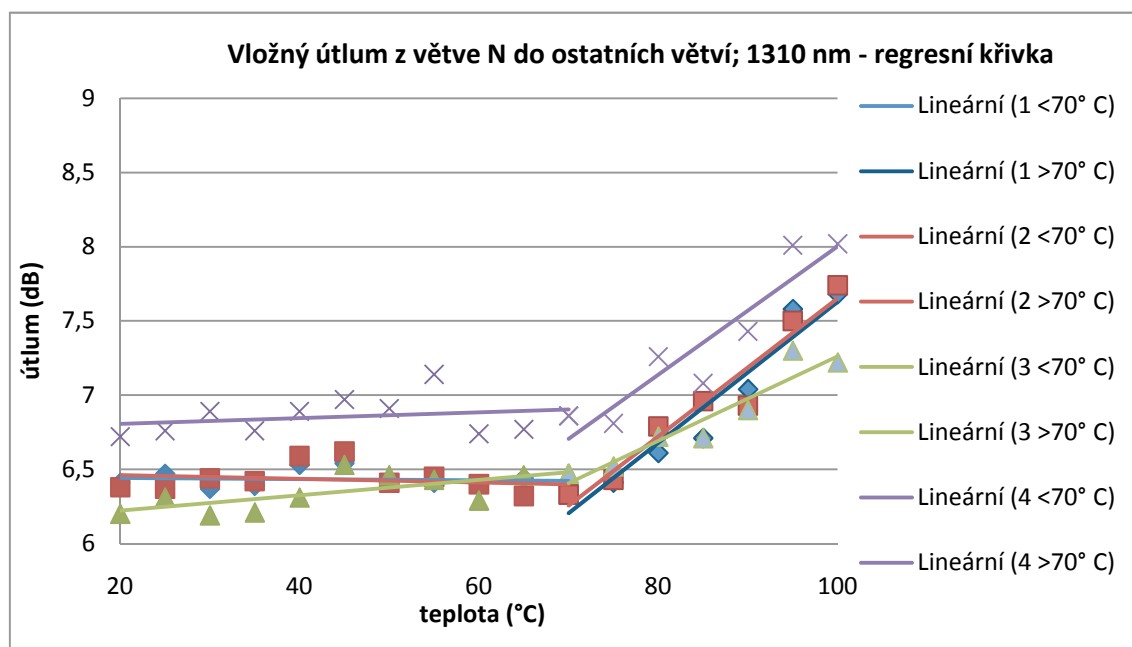
Pro potřeby tohoto měření přijmeme předpoklad, že nárůst útlumu na teplotě je lineární nebo lineární na nějakém sledovaném úseku. Proto byla použita lineární regrese. Pro popsání lineární regrese slouží vztah (31).

$$y(x) = ax + b \quad (31)$$

Pro popsání těsné vazby mezi naměřenými body a regresní křivkou slouží index determinace R^2 , pro který platí $0 \leq R^2 < 1$. Čím blíže se hodnota přibližuje 1, tím daná přímka lépe prokládá naměřené body a tím pádem se dá tvrdit, že u vyšších hodnot indexu determinace je závislost zvoleného parametru na teplotě téměř shodná s lineární přímkou.

Regresní analýza byla provedena pro parametry vložného útlumu a dělicího poměru.

9.1 Vložný útlum



Graf. 15: Vložný útlum z větve N do ostatních větví, při pracovní vlnové délce 1310 nm

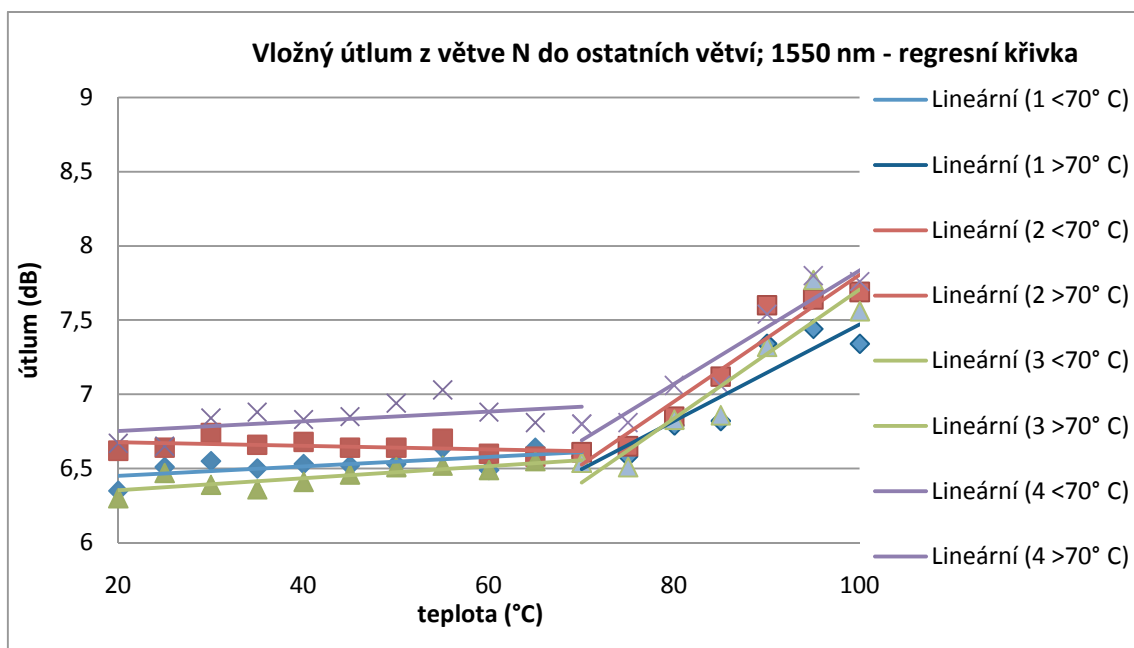
Graf 15 je rozdělen na dvě části, na regresní křivky hodnot pod 70 °C (v grafu značeno <70 °C) a na křivky nad 70 °C (v grafu značeno >70 °C). Při určování správné regresní funkce hraje roli zkušenost, ale i jiné faktory. Například při pohledu na graf 1 naměřených hodnot je patrné, že k nárůstu útlumu dochází až od určité teploty, proto jsou následující grafy rozděleny do dvou teplotních úseků. K použití více úseků nemusí docházet vždy a u dalších analyzovaných děličů tento postup použit nebyl. Hodnoty koeficientů a a b ze vztahu (31) pro graf 15 jsou v tabulce 4, stejně jako index determinace.

	a	b	R^2
1; <70° C	-0,0004	6,4499	0,0123
1; >70° C	0,0474	2,8857	0,9215
2; <70° C	-0,0013	6,4865	0,0471
2; >70° C	0,0465	3,0018	0,9416
3; <70° C	0,0052	6,1185	0,4827
3; >70° C	0,0285	4,4118	0,9025
4; <70° C	0,0019	6,7679	0,0664
4; >70° C	0,0432	3,6796	0,8694

Tab. 4: Koeficienty lineární regrese a index determinace pro přímky v grafu 15

Z grafu i z tabulky je patrné, že se závislost útlumu v oblasti pod 70 °C dá vyjádřit přímkou téměř rovnoběžnou s osou x . Vložný útlum v této oblasti dosahuje asi 6,5 dB, což odpovídá parametrům udávaným výrobcem, kdy výrobce deklaruje maximální vložný útlum v oblasti - 40 °C až + 70 °C na 7,1 dB. Nejblíže se této hodnotě přiblížil útlum na čtvrté větvi. Teplotní závislost udávaná výrobcem je 0,003 dB/ °C, když porovnáme tuto hodnotu s hodnoty koeficientu a z tabulky 4 v oblasti pod 70 °C, je patrné, že závislost na větvi 3 je v této oblasti nepatrně vyšší a ostatní větve vyhovují udávanému parametru. V oblasti nad 70 °C dochází ke strmějšímu nárůstu útlumu, což lze také vypočítat z koeficientu a v tab. 4. V oblasti mezi 70 °C a 100 °C dochází k nárůstu vložného útlumu o 11 % až 22 % podle dané větve.

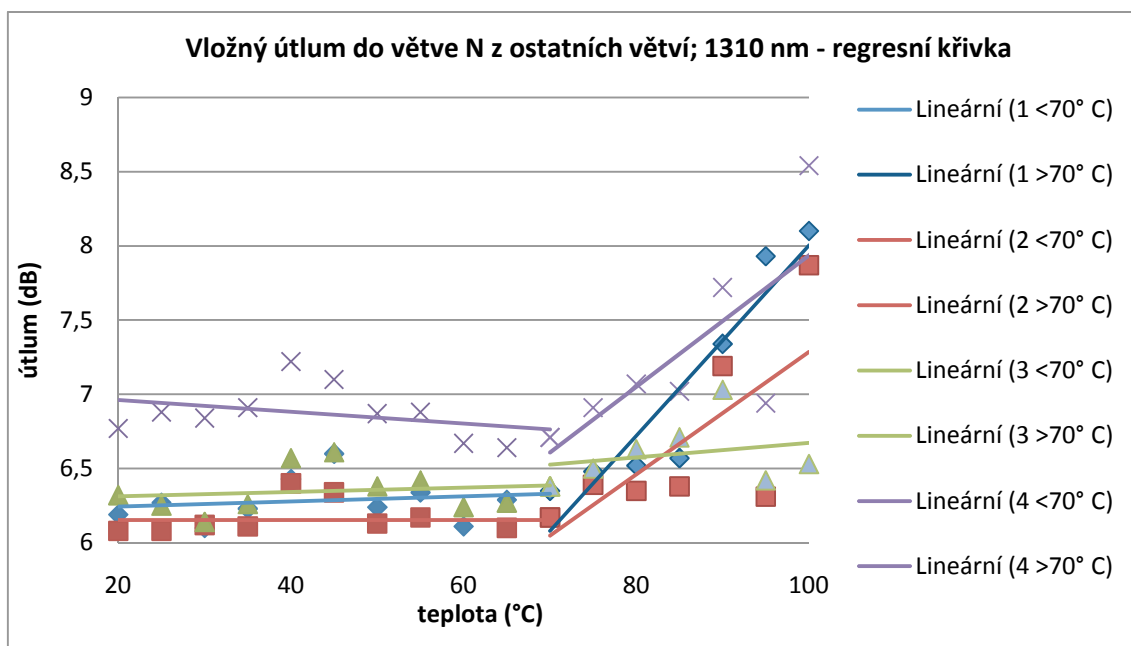
Podobné chování bylo naměřeno i pro pracovní vlnovou délku 1550 nm, tak i u vložného útlumu při vysílání optického výkonu do jednotlivých větví směrem k větvi N.



Graf. 16: Vložný útlum z větve N do ostatních větví, při pracovní vlnové délce 1550 nm

	a	b	R^2
1; <70° C	0,0032	6,3861	0,4558
1; >70° C	0,0325	4,2218	0,8674
2; <70° C	-0,0012	6,7012	0,1885
2; >70° C	0,0426	3,5411	0,9325
3; <70° C	0,0041	6,2713	0,7097
3; >70° C	0,0434	3,3704	0,8847
4; <70° C	0,0033	6,6856	0,2581
4; >70° C	0,0381	4,0193	0,9141

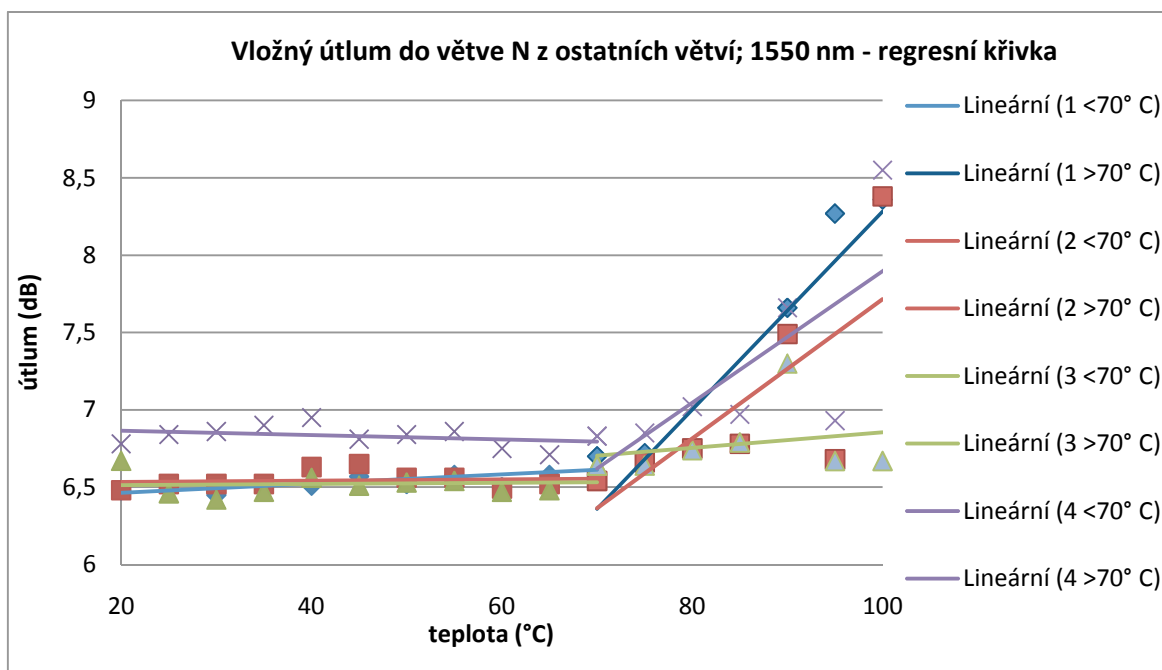
Tab. 5: Koeficienty lineární regrese a index determinace pro přímky v grafu 16



Graf. 17: Vložný útlum do větve N z ostatních větví, při pracovní vlnové délce 1310 nm

	a	b	R^2
1; <70° C	0,0017	6,2095	0,0389
1; >70° C	0,0641	1,5954	0,8743
2; <70° C	-0,00002	6,1545	0,000006
2; >70° C	0,0413	3,1564	0,5067
3; <70° C	0,0015	6,2828	0,0292
3; >70° C	0,0049	6,1811	0,0579
4; <70° C	-0,004	7,0411	0,1412
4; >70° C	0,0443	3,5086	0,5558

Tab. 6: Koeficienty lineární regrese a index determinace pro přímky v grafu 17

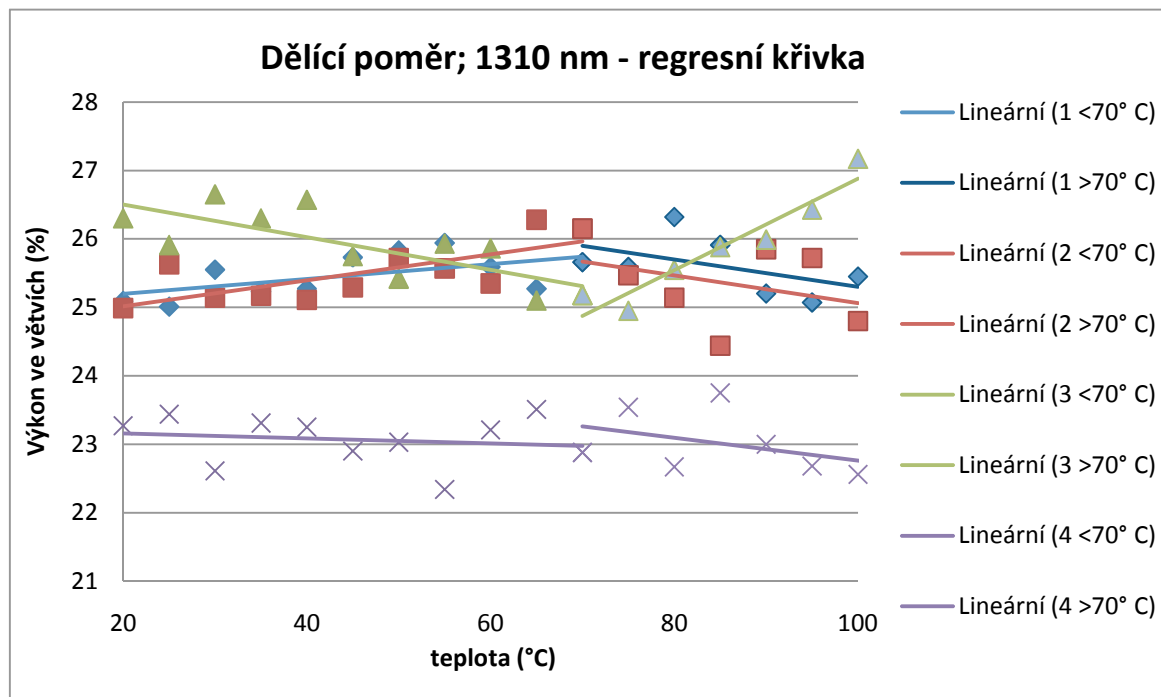


Graf. 18: Vložný útlum do větve N z ostatních větví, při pracovní vlnové délce 1550 nm

	a	b	R^2
1; <70° C	0,003	6,404	0,5366
1; >70° C	0,0641	1,8693	0,835
2; <70° C	0,0004	6,5265	0,0155
2; >70° C	0,045	3,215	0,5301
3; <70° C	0,0003	6,5072	0,0055
3; >70° C	0,0051	6,3475	0,0537
4; <70° C	-0,0014	6,8946	0,1261
4; >70° C	0,0426	3,64	0,5226

Tab. 7: Koeficienty lineární regrese a index determinace pro přímky v grafu 18

9.2 Dělicí poměr



Graf. 19: Poměr rozbočeného výkonu v jednotlivých větvích v závislosti na teplotě při pracovní vlnové délce 1310 nm

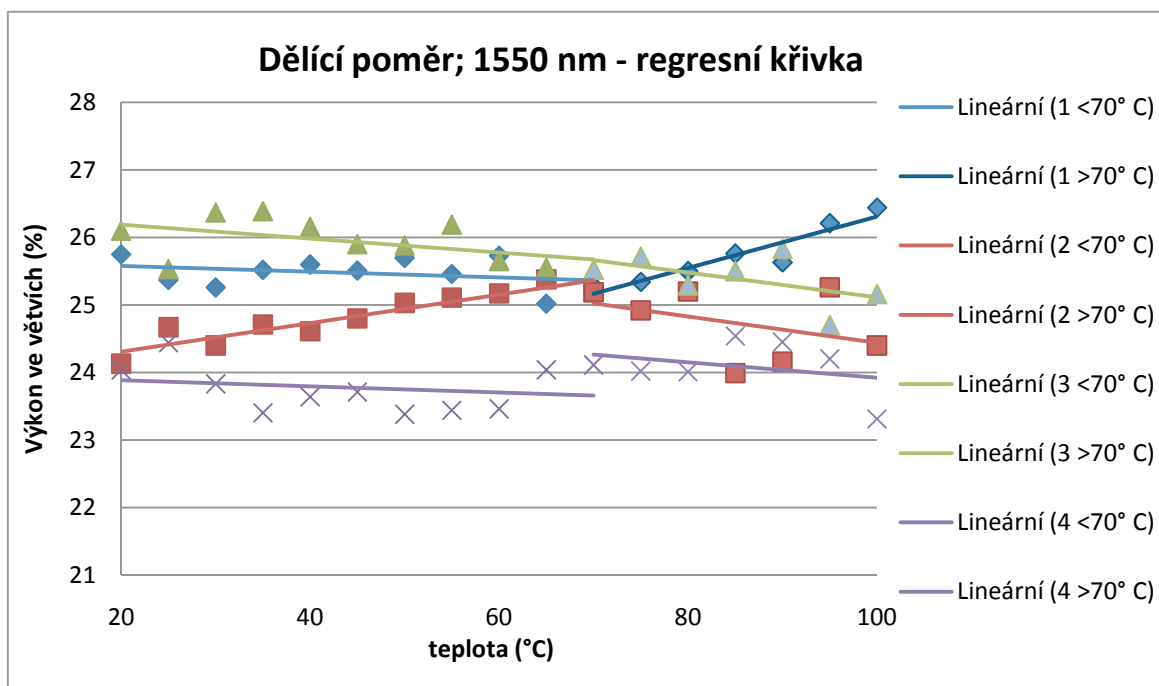
Jelikož se rozdělovala teplota na dva úseky u vložného útlumu, rozděluje se i u grafu závislosti poměru rozbočení na teplotě.

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²
1; <70° C	0,0109	24,98	0,3368
1; >70° C	-0,0199	27,294	0,257
2; <70° C	0,019	24,637	0,5452
2; >70° C	-0,0203	27,091	0,1301
3; <70° C	-0,0238	26,978	0,5684
3; >70° C	0,0669	20,19	0,9109
4; <70° C	-0,0037	23,234	0,029
4; >70° C	-0,0168	24,438	0,155

Tab. 8: Koeficienty lineární regrese a index determinace pro přímky v grafu 19

Dělicí poměr uváděný výrobcem je symetrických 1:4, kdy do každé výstupní větve je vázáno 25 % optického výkonu vstupní větve N. Z grafu 19 je patrné, že výkon ve větvích není symetrický: ve větvi 4 je přibližně 23 %, ve větvi 1 a 2 přibližně 25,5 % a ve větvi 3 26 % vstupního optického výkonu. Závislost dělicího poměru na teplotě je poměrně stabilní.

Výraznějším rysem je zde snad jen větší strmost zvýšení optického výkonu u teploty nad 70 °C, což je dáno menším nárůstem vložného útlumu ve větvi 3 v tomto teplotním úseku v porovnání s ostatními větvemi.



Graf. 20: Poměr rozbočeného výkonu v jednotlivých větvích v závislosti na teplotě při pracovní vlnové délce 1550 nm

	a	b	R^2
1; <70° C	-0,0043	25,666	0,0988
1; >70° C	0,0382	22,489	0,8869
2; <70° C	0,0212	23,882	0,8659
2; >70° C	-0,0195	26,389	0,1538
3; <70° C	-0,0103	26,394	0,2626
3; >70° C	-0,0184	26,955	0,2731
4; <70° C	-0,0046	23,98	0,0477
4; >70° C	-0,0114	25,063	0,0948

Tab. 9: Koeficienty lineární regrese a index determinace pro přímky v grafu 20

U pracovní délky 1550 nm je výkon dělený v děliči do jednotlivých větví vyjádřen procentuálně následovně: nejnižší je opět výkon ve čtvrté větvi asi 24 %, výkon ve větvi 2 asi 25 %, ve větvi 1 asi 25,5 % a ve větvi 3 asi 26 % pro teploty menší než 70 °C. U teplot vyšších než 70 °C se poměr výrazně nemění, snad jen lehce stoupá poměr výkonu ve větvi 1.

10. Závěr

V diplomové práci jsem prováděl měření závislosti parametrů pasivního optického děliče na teplotě, která se měnila v rozsahu 20 °C až 100 °C. Počet opakování měření byl čtyři pro každý ze dvou použitých zdrojů optického výkonu. Pro analyzování dat byl zprvu uvažován aritmetický průměr výběru, avšak ten byl zatížen poměrně velkou chybou měření vypočtenou v příloze. Proto byl k analýze dat použit medián z opakovaných měření. Výsledky a následná analýza pro dělič 1x4 při použití zdroje EXFO FLS-300-23BL a výsledné tabulky a grafy pro ostatní děliče jsou uvedeny v příloze.

Dělič 1x2 od firmy OPTOKON byl druhým děličem se známými deklarovanými parametry od výrobce, u děličů 1x3 a 1x5 tyto parametry známy nebyly.

Výsledky děliče 1x2 nenaznačují výraznou teplotní závislost vložného útlumu. Na celém měřeném úseku se hodnota vložného útlumu pohybovala v hodnotách přibližně 3,3 dB pro větve 2 a 3,4 dB pro větev 1 na pracovní vlnové délce 1310 nm. Podobné hodnoty jsme získali i při pracovní vlnové délce 1550 nm. Hodnota udávaná výrobcem je 3,6 dB, takže měření ukázalo, že dělič vyhovoval těmto hodnotám. Dělicí poměr na vlnové délce 1310 nm byl 51 % výkonu pro větev 2 a 49 % pro větev 1, což je přijatelná odchylka od 50 %. I zde byla teplotní závislost velmi malá.

Z deklarovaných parametrů pro dělič 1x3 byl znám pouze dělicí poměr který byl dán tabulkou 3. Z výsledků vyplývá, že u vlnové délky 1310 nm je maximální odchylka od naměřeného dělicího poměru 2 %, se stoupající teplotou zde se část výkonu z větve 3 přesunuje do větví 1 a 2, procentuální úbytek výkonu ve větvi 3 je přibližně - 0,02 % / °C. K výraznějšímu přesunu výkonu mezi větvemi dochází u vlnové délky 1550 nm, kdy procentuální poměr výkonu ve větvi 1 roste na úkor větve 3 rychlostí 0,0533 % / °C, to znamená že procentuální poměr výkonu ve větvi 1 vzrostl z hodnoty přibližně 41 % při počáteční teplotě 20 °C na hodnotu 46 % při teplotě 100 °C.

Parametry děliče 1x5 nebyly předem známy a z naměřených hodnot vyplývá, že se jedná o nesymetrický dělič. Přibližný poměr výkonu ve větvích pro vlnovou délku je 16 % pro větve 1, 15 % pro větev 2, 14 % pro větev 3, 25 % pro větev 4 a 30 % pro větev 5. Tyto hodnoty jsou ovšem velmi ovlivněny nestabilitou výkonu ve větvi 3. Při měření větve 3 docházelo častěji k odlehlým měřením, což způsobuje velkou nepřesnost měření. Nestabilita chování ve větvi 3 podle mého názoru nebyla způsobena rostoucí teplotou. Jedna z možných příčin je chyba při

svařování konce pigtailu k výstupu, nebo vadou samotného pigtailu. U výsledků měření vložného útlumu nedochází k výraznějším závislostem u jiných větví, než je větev 3.

Stejné měření bylo provedeno i pro druhý zdroj NOYES OLS2. Výsledky měření víceméně potvrzují nebo poopravují výsledky naměřené při použití zdroje 1. Například dělič 1x4, u kterého se objevila výraznější závislost na teplotě v pásmu nad 70 °C, při použití zdroje 2 vykazuje podobný charakter chování, avšak strmost růstu útlumu je rozdílná. Tyto odchylky v měření mohou být způsobeny tím, že obecně zdroj 2 byl zatížen větší chybou, jak je ukázáno v příloze, tak proto, že měření na zdroji 2, bylo prováděno po 10 °C a ne po 5 °C jak tomu bylo u prvního zdroje. Z těchto důvodů se dá měření na prvním zdroji považovat za směrodatné a měření na druhém zdroji jako doplňkové.

Některé parametry děličů zde nejsou analyzovány, ale jsou uvedeny v příloze. Analyzován není celkový útlum, který byl zatížen velkou chybou měření u aritmetického průměru. Vzhledem k malému počtu měření se předpokládá signifikantní chyba měření i u mediánu, která by mohla ovlivnit výslednou přímku závislosti. Takže s hodnotou celkového útlumu zde jde pracovat pouze jako s přibližným určením velikosti útlumu.

V průběhu měření jsem se seznamoval také s nedostatky zvoleného způsobu měření, při kterém se jedná hlavně o neustálé přepojování vláken mezi rozdílnými konci vláken různých děličů při určité teplotě. Jelikož se jednalo o velmi rozsáhlé měření, docházelo při získávání výsledků k několika tisícům přepojení konektorů. Každé přepojení sebou nese rizika, jako jsou znečištění ferule konektorů či změny v použitých optických vláknech při jejich manipulaci během procesu přepojování. Tyto malé změny jsem se snažil eliminovat kontrolou konektorů vláken a jejich čištění před každým měřením a snahou nezpůsobovat nechtěné ohyby vláken při manipulaci. Bylo by zajímavé provádět měření bez přepojování mezi výstupy děliče, ale získávat jeden parametr měření z konstantně zapojených měřících přístrojů. Toto jedno zapojení by se zahřívalo a získávaly by se hodnoty jednoho daného parametru v celém rozsahu bez přepojování. Výhodou by byla data, u kterých bychom už během procesu měření mohli vyčíst teplotní závislosti. Nevýhodou tohoto měření by ovšem byla časová náročnost a požadavek na větší počet stejných měřících přístrojů. Dalším zajímavým měřením by bylo měření světelného spektra signálu procházejícím děličem v závislosti na teplotě.

Obecně lze říci, že závislost útlumu na teplotě u pasivních optických děličů existuje, avšak není značná a v oblastech garantovaných výrobce je tato závislost lineární s velmi malou hodnotou strmosti zvětšování či zmenšování útlumu. U většiny z měřených vložných útlumů

nedochází k nárůstu útlumu větším než je $0,006 \text{ dB/ } ^\circ\text{C}$. Výsledky pro vlnové délky 1310 nm a 1550 nm jsou rozdílné, avšak se příliš neliší v absolutních hodnotách a zachovávají stejné tendence růstu či poklesu útlumu. Nejvýraznější změna v chování závislosti parametrů na teplotě nastala u děliče 1x4, kdy došlo k nárůstu útlumu při teplotách nad $70 ^\circ\text{C}$. Dělič 1x4 je detailněji popsán v této práci.

Seznam použité literatury

- [1] GHATAK, Ajoy, THYAGARAJAN, K. *Introduction to fiber optics*. Cambridge University Press, 1998. 565s.
- [2] LAFATA, Pavel. *Útlumová bilance pasivních optických přístupových sítí*. [online]. 2009 [cit. 2011-05-05]. Dostupný z WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?navezclanku=utlumova-bilance-pasivnich-optickych-pristupovych-siti&cislocclanku=2009060002>>.
- [3] TAKAHASHI, Hiroshi. *Planar lightwave circuit for optical communication: present and future*. [online]. 2003 [cit. 2011-04-05]. Dostupný z WWW: <<http://lib.semi.ac.cn:8080/tsh/dzzy/wsqr/SPIE/vol5246/5246-520.pdf>>.
- [4] VYBÍRAL, Bohumil. *Zpracování dat fyzikálních měření* [online]. [cit. 2011-05-05]. Dostupný z WWW: <<http://fo.cuni.cz/texty/mereni.pdf>>.
- [5] ŠEDIVÝ, Přemysl. *Teplotní závislosti fyzikálních veličin*. [online]. [cit. 2011-05-05]. Dostupný z WWW: <<http://fo.cuni.cz/texty/teplota.pdf>>.
- [6] KUCHARSKI, Maciej, DUBSKÝ, Pavel. *Měření přenosových parametrů optických vláken, kabelů a tras*. PRAHA: MIKROKOM, 1998. 141 s.
- [7] JEŘÁBEK, Vítězslav. *Technologie optických vlnovodů na křemíkovém substrátu*. [online]. [cit. 2011-05-05]. Dostupný z WWW: <<http://micro.feld.cvut.cz/home/X34SIF/materialy/vlnovod/CCC1.doc>>.
- [8] *SFT 01x02 Singlemode Couplers datasheet*. OPTOKON [online]. [cit. 2011-05-05]. Dostupný z WWW: <http://www.optokon.cz/datasheets/A-Passive_fiber_optic_components/A5-Couplers,Splitters/CPL_06-02_EN-SFT-S35-01x02.pdf>.

- [9] *SFT-S35-01xN Wavelength Independent Singlemode Dual Windows Couplers datasheet*. OPTOKON [online].
[cit. 2011-05-05]. Dostupný z WWW: < http://www.optokon.cz/datasheets/A-Passive_fiber_optic_components/A5-Couplers,Splitters/CPL_08-02_EN-SFT-S35-01xN.pdf>.
- [10] *Fused Biconical Taper Process*. [online].
[cit. 2011-05-05]. Dostupný z WWW: < <http://www.gouldfo.com/gfo/fbt.aspx>>.

Následující dokumenty jsou součástí přiloženého CD

Seznam příloh:

LEGENDA - MEDIÁN

LEGENDA – VYPOČTENÉ HODNOTY

LEGENDA – ZDROJ

Soubory programu EXCEL s naměřenými a vypočtenými hodnotami a grafy:

MEDIÁN ZDROJ 1

MEDIAN ZDROJ 2

MĚŘENÍ ZDROJ 1 – 1. MĚŘENÍ

MĚŘENÍ ZDROJ 1 – 2. MĚŘENÍ

MĚŘENÍ ZDROJ 1 – 3. MĚŘENÍ

MĚŘENÍ ZDROJ 1 – 4. MĚŘENÍ

MĚŘENÍ ZDROJ 2 – 1. MĚŘENÍ

MĚŘENÍ ZDROJ 2 – 2. MĚŘENÍ

MĚŘENÍ ZDROJ 2 – 3. MĚŘENÍ

MĚŘENÍ ZDROJ 2 – 4. MĚŘENÍ

VYPOČTENÉ HODNOTY 1

VYPOČTENÉ HODNOTY 2